E. C. A. M.
BRUXELLES
★ ★ ★

3e ANNÉE

Constructions électriques

VOLUME 1

par E. MEYER

1963

A V A N T - P R O P O S

La construction des machines électriques est en continuelle évolution.

Le principe du fonctionnement des machines électriques est connu depuis longtemps.

L'évolution porte essentiellement sur les matières nouvelles et sur les procédés de fabrication.

Accessoirement, on réalise encore des progrès dans le sens d'un maniement plus aisé des machines, par exemple, dans les dispositifs de fixation.

La construction d'une machine repose sur un certain nombre d'exigences :

- la machine doit être peu coûteuse
- le rendement en énergie doit être élevé
- l'échauffement doit être limité
- l'isolement des pièces sous tension doit être adapté au service et aux incidents éventuels d'exploitation
- les parties de la machine doivent être capables de résister mécaniquement aux efforts normaux et aux efforts extraordinaires susceptibles de se produire lors de l'apparition d'incidents d'exploitation.

Toutes ces exigences ne peuvent être satisfaites complètement simultanément. Un compromis basé sur des conditions économiques est nécessaire.

A titre d'exemple, une machine de puissance donnée peut être conçue de deux façons:

a) une machine légère de rendement moyen

b) une machine lourde, donc coûteuse, dont le rendement sera supérieur à celui de la première.

Le choix entre les deux types de machines sera établi en tenant compte de l'économie réalisée sur l'énergie consommée, donc en dernière analyse on se décidera à construire tel ou tel type de machine en considérant le prix du kWh ou du combustible.

Les progrès dans la ventilation ont rendu possible la réduction du volume des machines.

Les progrès dans l'usinage des pièces ont modifié profondément les conceptions de construction des pièces constitutives.

Un projet de machine électrique doit toujours être établi en fonction d'impératifs économiques.

Dans cet ordre d'idée, on ne perdra pas de vue l'avantage de la standardisation de certaines pièces qui peuvent être utilisées dans une série de machines similaires par la forme mais différentes par la puissance développée.

En Belgique, l'Institut Belge de Normalisation (I.B.N.) publie des normes en collaboration avec le Comité Electrotechnique Belge (C.E.B.) afin d'établir des règles qui donnent aux usagers des machines l'assurance que celles-ci ont été construites suivant des règles de sécurité. Ces normes portent le sigle NBN n°...

La garantie qu'une machine a été construite d'après une norme NBN doit être exigée par tout usager soucieux de ses véritables intérêts.

En Allemagne, les normes V.D.E., en France, les normes publiées par l'U.S.E. donnent également la sécurité voulue. Il existe assez souvent un parallélisme entre les règles V.D.E. et N.B.N.

En Angleterre, il existe des normes B.S.S., aux U.S.A. les normes A.S.A. et en Suisse les normes A.S.E.

x

x x

L'auteur a fait de larges emprunts aux livres remarquables de MM. Mauduit et Lagron, ainsi qu'au cours de son prédécesseur M. Maon.

x

x x

Cette nouvelle édition diffère de la première par les points suivants:

- Usage du système M.K.S. généralisé, au lieu du système d'unités ancien
- Utilisation des symboles internationaux afin de permettre au lecteur d'utiliser ultérieurement sans aucune difficulté la littérature technique allemande et anglaise
- Présentation originale de certains calculs et introduction de théorèmes nouveaux sur les grandeurs fondamentalesπ

x

x x

CALCUL D'UNE MACHINE ELECTRIQUE

Les étudiants devront calculer un certain nombre de machines électriques afin de mieux comprendre la machine et de se rendre ainsi mieux compte de la raison des dimensions des diverses parties constitutives.

Le dessin de la machine obligera le lecteur à penser à toutes les difficultés pratiques et le familiarisera avec des problèmes de construction bien concrets.

Il n'est pas question pour l'étudiant d'étudier complètement la machine comme si cette dernière était construite pour la première fois dans le monde, il faut au contraire que l'étudiant utilise les données expérimentales acquises depuis des dizaines d'années afin que cette expérience ne soit pas perdue.

L'élaboration du projet exigera de l'étudiant un effort de réflexion pour coordonner tous les concepts et pour ... se retrouver dans les unités et les paramètres.

Le projet sera complété d'un rapport qui résume les diverses étapes de la marche des calculs et justifie les dimensions des éléments fondamentaux de la machine.

Le projet sera complété par une série de dessins cotés de la machine.

Les étudiants s'appliqueront à construire une machine valable surtout du point de vue économique c'est-à-dire qu'il faut que les contraintes thermiques, magnétiques, électriques, diélectriques, etc ... soient raisonnables.

Il faut s'inspirer des conseils suivants :

TEXTE :

Le texte sera concis sans rappel inutile d'explication évidente.

Le texte sera illustré chaque fois que mécessaire par un croquis explicatif.

Le texte sera rédigé avec clarté et précision. Les termes utilisés seront les termes corrects ne prêtant à aucune confusion. L'obligation d'éviter les ambiguités de langage est un excellent exercice à tout point de vue.

Il faut éviter d'alourdir les calculs en insérant des décimales superflues.

ORDRE DES CALCULS :

Les calculs seront subdivisés de façon à en permettre la vérification aisée.

Un tableau indiquant les notations utilisées sera joint. On devra faire apparaître clairement les données, les valeurs calculées.

Le texte se terminera par un tableau résumant les caractéristiques principales de la machine.

PLANS :

Les plans seront exécutés en même temps que les calculs dès que ceux-ci sont suffisamment poussés.

Les plans doivent représenter l'ensemble de la machine et les parties les plus importantes au point de vue construction : circuit magnétique, bobinage, encoches, collecteur, arbre, dispositif de refroidissement et d'isolement, schéma de bobinage.

Il faut un plan par sujet important montrant les vues nécessaires. Chaque plan portera un titre complet et concis, l'échelle et la légende.

La légende donne sous forme de tableau la nomenclature des pièces principales, les matières utilisées. On utilisera des numéros de référence qui se retrouveront sur le dessin.

On ne perdra pas de temps à dessiner en détail les boulons, vis, écrous, goupilles et pièces similaires.

On prendra une échelle formant un rapport simple : 1/1 , 1/2 , 1/5 , 1/10 , etc ...

x

x x

Le texte du projet sera présenté sur papier format commercial ou A4 (210 x 297 mm) et sera accompagné de la feuille de calcul complètement remplie.

Pour les plans, on utilisera au plus le format A2 420 x 594 mm et on fera choix des formats normalisés de A2 à A5.

Les dessins seront dessinés sur calque, ils porteront le titre, le nom de l'auteur, la date et le nom de l'école. Ils seront joints au projet.

Le texte et les plans seront attachés dans une farde ou une chemise 250 x 300 mm portant le titre, le numéro du projet, le nom de l'auteur, la date, le nom de l'école.

Les plans de format supérieur à A4 seront convenablement pliés pour les ramener à ce format, en permettre le dépliement aisé. Il est défendu de les rouler.

C H A P I T R E I

THEORIES GENERALES SUR L'ECHAUFFEMENT ET LE REFROIDISSEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES

§ 1 . Pertes dans le cuivre et le fer

1. Pertes dans le cuivre
2. Pertes dans le fer
3. Pertes totales et rendement

§ 2 . Echauffement des machines

1. Lois de la transmission de la chaleur
2. Loi théorique de l'échauffement
3. Loi théorique du refroidissement
4. Remarques
5. Service continu et intermittent

§ 3 . Refroidissement des machines

1. Ventilation et protection mécanique
2. Mode de refroidissement
3. Ventilation des machines rotatives
4. Ventilation à l'hydrogène
5. Refroidissement des transformateurs

§ 4 . Grandeurs caractéristiques de l'échauffement

Perte par effet Joule

§ 1 . PERTES DANS LE CUIVRE ET LE FER

1. PERTES DANS LE CUIVRE :

Le cuivre est le métal le plus utilisé comme conducteur de courant en construction électrique.

L'aluminium est parfois utilisé dans les induits pour réduire les efforts dus à la force centrifuge. Généralement, on utilise dans les rotors des moteurs asynchrones à cage d'écureuil des barres d'aluminium coulé sous pression. Ce procédé est plus économique, il permet d'obtenir un rotor robuste de poids moindre. L'économie résulte du fait que la coulée permet d'éviter les soudures ou brasures.

Les enroulements des électroaimants de levage sont souvent exécutés en aluminium oxydé superficiellement afin d'obtenir une meilleure évacuation des calories produites par effet Joule dans les enroulements (L'oxyde d'aluminium est isolant pour des tensions de l'ordre de quelques centaines de volts).

Les pertes dans les conducteurs dépendent de la nature du courant.

En COURANT CONTINU, les pertes sont exclusivement dues à l'effet Joule. En COURANT ALTERNATIF, il faut prévoir en outre des pertes supplémentaires dues :

1) aux courants de Foucault créés dans les enroulements par le flux engendré par le courant
2) aux pertes dues à l'effet pelliculaire qui augmente la densité de courant sur la périphérie des conducteurs
3) à l'effet de proximité qui se produit quand deux conducteurs se font face. Dans ce cas le courant est le plus intense sur les faces placées en face l'une de l'autre
4) les pertes supplémentaires augmentent avec la fréquence et avec la section offerte au passage du flux
5) elles diminuent quand la résistance du conducteur augmente.

Pour réduire les pertes supplémentaires, on peut :

1) utiliser des conducteurs rectangulaires pour allonger le trajet des courants de Foucault pour accroître la résistance offerte au passage de ces courants et placer les conducteurs de façon que le flux de dispersion pénètre par la petite face
2) on peut en outre subdiviser les conducteurs en barres plates mises en parallèle aux extrémités en croisant les barres élémentaires pour qu'elles occupent toutes les positions possibles; cet artifice réduit les courants d'échange entre les barres.

EXEMPLE : A la température de 20°C et à la fréquence de 50 Hz, le % des pertes supplémentaires dues à l'effet pelliculaire, est donné au tableau ci-dessous :

Rayon cm	1	2	4	Section cm^2	2	1	2/3
Pertes suppl.%	2,6	32,4	139,6	Pertes sup.%	46	16	8

Les pertes par effet Joule, pertes supplémentaires exclues, sont données par la formule :

$$P_J = R\,I^2 = \rho \frac{1}{s} I^2$$

où l , s représentent respectivement la longueur et la section du conducteur.

Si on fait apparaître la notion de densité de courant : $J = \frac{I}{s}$ il vient :

$$P_J = \rho\, l\, J\, I = \rho\, l\, s\, J^2$$

Or, le volume du conducteur : $V = l \cdot s$ d'où :

$$P_J = \rho\, V\, J^2$$

Appelons Δ le poids spécifique et G le poids, il vient:

$$\boxed{P_J = \rho \frac{G}{\Delta} J^2}$$

On exprime : P_J en Watts
G en kg
J en A/mm^2
Δ en kg/dm^3

Pour le cuivre :

à 75°C : $P_J = 2{,}35\ J^2\ G$ $\quad\rho = 2{,}1 \times 10^{-2}$ à 75°C

à 95°C : $P_J = 2{,}5\ J^2\ G$ $\quad\rho = 2{,}3 \times 10^{-2}$ à 95°C

Pour l'aluminium :

à 75°C : $P_J = 12{,}6\ J^2\ G$ $\quad\rho = 3{,}4 \times 10^{-2}$ à 75°C

On considère un fil de 1 m de long dont la section est de 1 mm^2.

REMARQUES :

1) L'échauffement moyen d'une machine électrique ou plutôt l'échauffement moyen d'un enroulement est souvent mesuré par l'accroissement de résistance par rapport à l'état froid. Appelons R_c et R_f la résistance à chaud et la résistance à froid.

$$\text{Variation de température moyenne} = \frac{R_c - R_f}{R_f} (t_{amb} + 234,5)$$

où t_{amb} mesure la température ambiante.

Cette formule est valable si la température ambiante est constante. Si la température ambiante varie appelons t_{ai} et t_{af} la température initiale et la température finale, la formule est corrigée comme suit :

$$\text{Variation de température moyenne} = \frac{R_c - R_f}{R_f} (t_{af} + 234,5) - (t_{af} - t_{ai})$$

2) Caractéristiques des métaux :

CARACTERISTIQUES		Cuivre	Aluminium	Argent
Densité kg/dm^3		8,9	2,77	10,45
Charge de rupture kg/mm^2		40	20	29
Chaleur spécifique kcal/kg		0,093	0,21	0,056
Résistivité en ohm par $\frac{m \text{ de longueur}}{mm^2 \text{ de section}}$	à 0°C	0,016	0,026	0,0146
	à 75°C	0,021	0,034	
Coefficient température α		1/234,5	1/230	
Conductibilité calorifique en $\frac{Watts}{m^2}$		384	204	418

On peut voir à la lecture de ce tableau que la résistivité de l'aluminium vaut 1,7 fois celle du cuivre mais que la densité du cuivre vaut 3,3 fois celle de l'aluminium et que par conséquent, à résistance ohmique égale, le poids d'un conducteur en aluminium est environ la moitié de celui d'un conducteur en cuivre.

2. PERTES DANS LE FER :

Les pertes magnétiques apparaissent dans les circuits magnétiques dès qu'il y a variation du flux (variation en grandeur ou en position : champ tournant). Pour réduire ces pertes, les circuits magnétiques sont feuilletés, c'est-à-dire constitués de tôles minces (épaisseur : 0,35 mm) isolées et assemblées.

On désigne en général les tôles magnétiques par leur qualité qui exprime la somme des pertes totales normales par hystérésis et courants de Foucault, à la fréquence de 50 Hz sous une induction de 1 Wéber/m^2 par kg de tôles.

Les qualités courantes utilisées sont :

- pour les transformateurs : 1 à 1,6 W par kg (hypersil 0,6)
- pour les machines rotatives : 1,3 à 3,6 W par kg

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence et au carré de l'induction :

$$P_H = K_H \quad f \quad B^2 \qquad \text{par kg}$$

Dans les calculs industriels, on admet l'exposant 2 pour B et on ne fait pas de distinction entre les pertes par champ tournant ou champ alternatif.

Les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence et au carré de l'induction :

$$P_F = K_F \quad f^2 \quad B^2 \qquad \text{par kg}$$

Les pertes par hystérésis et courants de Foucault peuvent être calculées à partir d'une formule unique :

$$P_{H+F} = K_{H+F} \cdot \alpha_f \cdot P_o \cdot B^2 \cdot G_{fer}$$

où K_{H+F} représente un produit de coefficients qui tiennent compte de la nature et forme des tôles

α_f représente un coefficient fonction de la fréquence du cycle d'aimantation

P_o représente les pertes par kg de tôles soumises à une induction maximum de 1 Wéber/m^2 à la fréquence de 50 cycles/sec.

B représente l'induction maximum en Wéber/m^2

G_{fer} représente le poids des tôles.

En outre des pertes magnétiques dans le fer des machines électriques doivent être considérées en supplément des pertes normales par hystérésis et courants de Foucault. Ces pertes peuvent valoir de 40 à 70% des pertes normales.

Elles sont dues:

1) aux défauts d'isolation entre tôles, ce qui crée des courants de Foucault supplémentaires
2) aux bavures et à l'écrouissage des tôles. L'écrouissage modifie la structure du métal et il faut recuire les tôles pour réduire les pertes. Les tôles hypersil exigent un recuit après tout travail mécanique afin de conserver l'intégralité de leurs propriétés magnétiques.

Dans certains types de machines, on mesure avant le bobinage, les pertes des circuits magnétiques en enroulant quelques spires sur ces circuits magnétiques.

Des pertes supplémentaires sont dues également aux flux secondaires : flux de dispersion des transformateurs, pulsation du flux dans les dents des machines rotatives, etc ...

Citons également les pertes dues aux courants de Foucault engendrés dans les pièces magnétiques ou conductrices soumises à des variations de flux (cales d'encoches, fils de frettage des têtes de bobines, plateaux-paliers, etc ...).

Le tableau suivant donne la répartition des pertes magnétiques normales pour diverses qualités de tôles magnétiques au silicium.

Ce tableau a été établi par MM. Langlois-Berthelot et Damierbe.

REPARTITION DES PERTES MAGNETIQUES A 50 Hz POUR UNE INDUCTION DE 1 WEBER/m^2

% Si	Qualité P_o/kg	Hystérésis P_o/kg	Force P_o/kg	Remarque
0,5	3,6	2,2	1,4	Les différences entre échantillons de même teneur en Si sont dues au traitement thermique
0,5	3,6	2,8	0,8	
2	2,4	2	0,4	
2	2,6	2	0,6	
4	1,6	1,3	0,3	
4	1,35	1,05	0,3	

Une comparaison entre les pertes par effet Joule dans le cuivre et les pertes magnétiques normales par hystérésis et courants de Foucault par kg de matière sous des contraintes électriques et magnétiques normales est donnée ci-après :

P_J = 20 à 40 W/kg pour J de 3 à 4 A/mm^2

P_{Fe} = 4 à 5 W/kg pour B compris entre 1/4 et 1/6 $Wéber/m^2$

Ces valeurs sont établies pour une fréquence de 50 Hz.

Les pertes par effet Joule sont approximativement 5 à 10 fois supérieures aux pertes magnétiques. Toutefois les pertes supplémentaires peuvent modifier ce rapport.

3. PERTES TOTALES ET RENDEMENT :

Dans certains cas, les pertes totales de certaines machines électriques peuvent s'exprimer de la façon suivante :

$$P_T = a + b P_B^2$$

où P_T représente les pertes totales

a et b sont deux constantes de la machine

P_B représente la puissance électrique aux bornes de la machine.

Cette formule est valable lorsque les deux conditions suivantes sont réalisées simultanément :

1) vitesse approximativement constante (ou nulle)
2) flux approximativement constant

Ces deux conditions sont réalisées dans les transformateurs, les machines synchrones et les moteurs asynchrones.

Le terme a représente les pertes constantes (pertes magnétiques dans le fer, pertes par frottement, ventilation, etc ...).

Le terme bP_B^2 représente les pertes variables, proportionnelles au carré de la puissance aux bornes.

On définit le rendement η d'une machine par le rapport :

$$\eta = \frac{P_{utilisable}}{P_{absorbée}} = \frac{P_{utilisable}}{P_{utilisable} + \text{pertes}}$$

Dans le cas d'une génératrice :

$$P_{utilisable} = P_B \text{ (puissance aux bornes)}$$

$$\eta = \frac{P_B}{P_B + a + b P_B^2}$$

Dans le cas d'un moteur :

$$P_{utilisable} = \text{puissance aux bornes} - \text{pertes}$$

$$P_{utilisable} = P_B - \text{pertes} = P_B - (a + b P_B^2)$$

$$\eta = \frac{P_B - (a + b P_B^2)}{P_B}$$

Afin de rechercher le η maximum dérivons η par rapport à P_B :

a) cas de la génératrice :

$$\eta = \frac{P_B}{P_B + a + b P_B^2}$$

$$\frac{d\eta}{dP_B} = \frac{(P_B + a + b P_B^2) - (1 + 2 b P_B) P_B}{(P_B + a + b P_B^2)^2} = \frac{a - b P_B^2}{(P_B + a + b P_B^2)^2}$$

b) cas du moteur :

$$\eta = \frac{P_B - (a + b P_B^2)}{P_B}$$

$$\frac{d\eta}{dP_B} = \frac{(1 - 2 b P_B) P_B - [P_B - (a + b P_B^2)]}{P_B^2} = \frac{P_B - 2 b P_B^2 - P_B + a + b P_B^2}{P_B^2}$$

$$\frac{d\eta}{dP_B} = \frac{a - b P_B^2}{P_B^2}$$

Dans les deux cas la dérivée $\frac{d\eta}{dP_B}$ s'annulle pour $a - b P_B^2 = 0$

ou $P_B = \sqrt{\frac{a}{b}}$

Portons les pertes en ordonnées, les pertes a sont représentées par une droite parallèle à l'axe de la puissance aux bornes. Les pertes bP_B^2 sont représentées par une parabole.

Pour le point M: $a = b P_B^2$, le rendement est maximum. Le rendement est nul pour $P_B = 0$, la courbe du rendement a donc la forme indiquée.

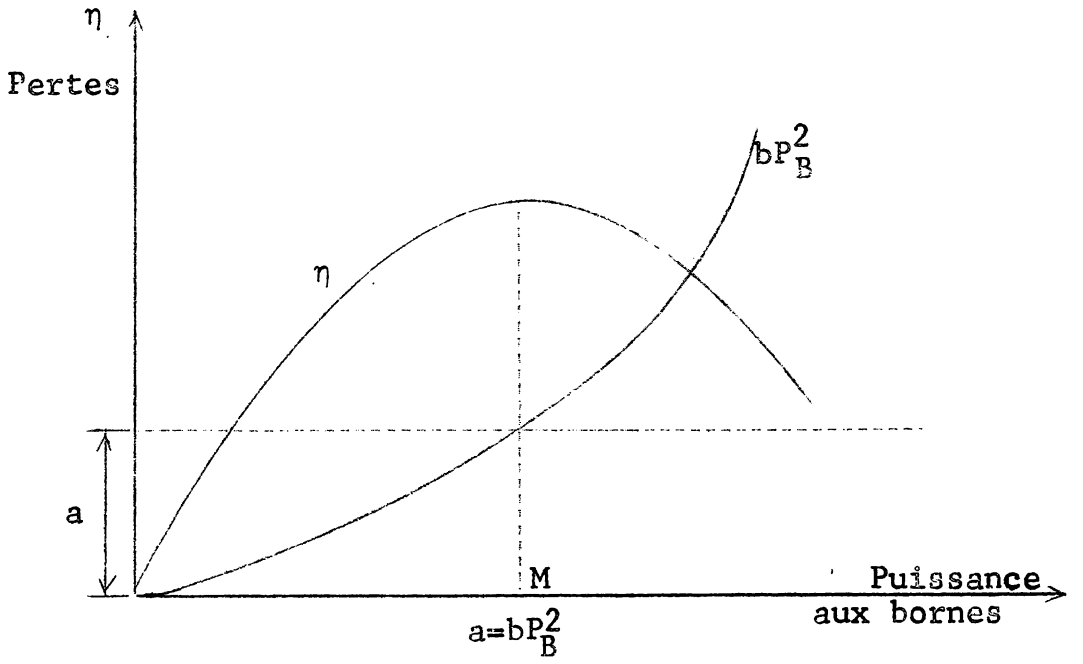


FIGURE 1

§ 2 . ECHAUFFEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES

1. RAPPEL DES LOIS DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR :

La chaleur se transmet :
- par conductibilité (à l'intérieur d'un corps)
- par rayonnement (dans l'espace)
- par convection (au milieu ambiant)

a) Loi de transmission par conductibilité

Dans une plaque homogène de section s et d'épaisseur a dont les deux faces sont soumises à une différence de température $\Delta\theta$ °C, la quantité de chaleur qui passe d'une paroi à l'autre est donnée par la formule :

$$P = C \frac{s}{a} \Delta\theta$$

s est mesuré en m^2

a est mesuré en m

P représente le flux de chaleur en Watts

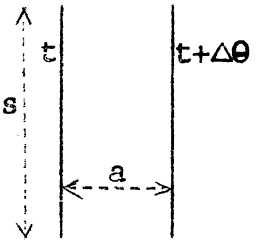


FIGURE 2

b) Loi de la transmission par rayonnement

La loi de Stephan-Boltzmann permet de calculer la chaleur rayonnée :

$$P_r = a\,(T_1^4 - T_o^4)\,S_{env.}$$

P_r = flux de chaleur rayonnée vers l'extérieur

a = coefficient de rayonnement qui dépend de la nature du corps rayonnant (couleur) mais non de l'ambiance vers laquelle s'effectue le rayonnement, ce coefficient dépend aussi de la direction dans laquelle la chaleur est transmise

T_1 = température absolue de la surface du corps

T_o = température absolue du milieu ambiant

$S_{env.}$ = surface enveloppe du corps qui rayonne en m^2

La loi de Stephan-Boltzmann peut être remplacée par une loi approchée, lorsque l'écart $T_1 - T_o$ est faible par exemple inférieur à 50 ou 60°C:

$$P_r \simeq \alpha_r\, S_{env.}\, \Delta\theta \qquad \text{où} \quad \Delta\theta = T_1 - T_o$$

α_r varie avec $\Delta\theta$ et la température ambiante comme le montre le tableau ci-dessous.

VALEURS DE α_r EN $\frac{\text{Watts}}{m^2}$

$\Delta\theta$ en degrés	Température ambiante en °C		
	10°C	20°C	30°C
	α_r	α_r	α_r
5	4,63	5,03	5,55
20	4,91	5,42	5,98
40	5,40	6,05	6,59
60	6,03	6,62	7,25
80	6,67	7,30	7,98

c) Loi de la transmission par convection (Newton)

Cette loi s'exprime par la relation :

$$P_c = \alpha_c \; S \; \Delta\theta$$

où P_c représente le flux de chaleur transmis par convection

α_c représente le coefficient de convection

S représente la surface développée du corps qui émet la chaleur

$\Delta\theta$ représente l'écart de température entre la surface du corps et le milieu ambiant

Remarque : la convection est le mode de transmission de la chaleur au moyen d'un fluide (liquide ou gaz) qui sert de véhicule aux calories émises.

Le chauffage par convection est toujours lié au déplacement du fluide.

Un radiateur de chauffage central élève la température de l'air qui se trouve dans son voisinage, le gaz s'élève, est remplacé par de l'air qui s'échauffe à son tour, etc ... de façon à chauffer l'ensemble de la pièce.

VALEURS NUMERIQUES DE α_c

1) En circulation naturelle d'air ou d'huile de transformateur, dans l'air :

$$\alpha_c = 6,5 + 0,05\ \Delta\theta \qquad \text{en } W/m^2$$

pour une vitesse de l'air inférieure à 2 m/s

dans l'huile :

$$\alpha_c = 40,3 \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{H}} \qquad \text{en } W/m^2$$

où H représente la hauteur du corps chaud en m

$\Delta\theta$ l'écart de température en °C

Ordre de grandeur :

dans l'air : $\alpha_c = 8\ W/m^2$

$\alpha_{c+r} = 10\ W/m^2$ surface horizontale

$= 12,5\ W/m^2$ surface verticale

dans l'huile : $\alpha_c = 100$ à $125\ W/m^2$

2) En circulation forcée :

La vitesse de l'air par rapport à la surface joue un grand rôle.

Le coefficient α_c/m^2 vaut 40 à 55 pour une vitesse de 10 m/s.

Le coefficient α_c/m^2 vaut 130 à 175 pour une vitesse de 40 m/s.

On constate que le coefficient de convection est beaucoup plus élevé dans l'huile que dans l'air, il y a donc un intéret à utiliser l'huile comme fluide réfrigérant.

Toutefois si l'on fait usage de vent soufflé, le coefficient de convection croit rapidement avec la vitesse de l'air.

Il faut noter que l'utilisation d'huile comme fluide réfrigérant ne résoud pas tout le problème du refroidissement car il faut refroidir ensuite la masse d'huile au moyen de cuves ailettées.

EXEMPLE NUMERIQUE

Considérons une aire d'un dm^2 sur une plaque de cuivre plane infinie, épaisse de 2 cm à travers laquelle passe un flux de chaleur de 10 W. Cette plaque est baignée d'un côté par de l'air dont il s'agit de déterminer la température quand l'autre face est à la température de 0°C.

Calculons la chute de température à l'intérieur de la plaque et à la surface :

- à l'intérieur : $P = C \frac{s}{a} \Delta\theta$ où $C = 384$

$$\Delta\theta = \frac{P \times a}{C \times s} = \frac{10 \times 0,02}{384 \times 1/100} \simeq 0,05$$

- à l'extérieur : $P = \alpha_{c+r} \cdot S \cdot \Delta\theta$ $\alpha_{c+r} = 12,5$

$$\Delta\theta = \frac{P}{\alpha_{c+r} \cdot S} = \frac{10}{12,5 \cdot \frac{1}{100}} = 80$$

La plaque aura donc les températures suivantes :

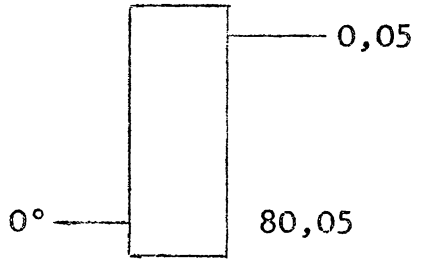


FIGURE 3

La chute de température dans la plaque est négligeable devant l'écart régnant entre l'air et la surface de la plaque baignée par ce fluide.

2. LOI DE L'ECHAUFFEMENT :

Considérons une machine à la température de l'air ambiant au moment de la mise sous tension déterminons la loi d'échauffement de cette machine en fonction du temps.

Hypothèses simplificatrices:

a) La machine est un corps homogène, de conductibilité infinie, de chaleur spécifique connue.

(On néglige ainsi la chute de température interne, produite par l'évacuation des pertes).

b) La puissance dissipée dans les pertes est constante (on néglige donc la variation de résistance en fonction de la temrature).

c) Le coefficient d'échange de chaleur avec l'ambiance par convection et rayonnement exprimé en Watts par unité de surface extérieure de la machine et par degré centigrade d'écart de température entre la machine et l'ambiance est constant.

Il est évident qu'en régime c'est-à-dire lorsque la machine a atteint une température constante, toute la chaleur produite par les pertes est évacuée dans l'ambiance.

Avant d'atteindre le régime de température les pertes sont divisées en deux parties : celles qui échauffent la machine et celles qui sont transmises au milieu ambiant.

Appelons :

P la puissance dissipée dans les pertes, mesurée en Watts

t le temps mesuré en secondes

S la surface extérieure en m^2

G le poids de la machine en kg

C la chaleur spécifique Joule/kg

Θ l'échauffement par rapport à l'ambiance

α le coefficient d'échange de chaleur avec l'ambiance W/m^2

La quantité de chaleur engendrée pendant un temps dt vaut P dt exprimée en Joules.

La quantité de chaleur absorbée par la machine pendant le même temps dt vaut en appelant $d\Theta$ l'accroissement de température de la machine durant ce même temps :

$$(G \cdot C \cdot d\Theta) \quad \text{Joules}$$

La quantité de chaleur transmise à l'ambiance pendant le même temps dt vaut :

$$S \cdot \alpha \cdot \Theta \cdot dt$$

$$P\,dt = G\,C\,d\Theta + S\,\alpha\,\Theta\,dt$$

Divisons les deux membres par $S\,\alpha$

$$\frac{P\,dt}{S\,\alpha} = \frac{G\,C}{S\,\alpha}\,d\Theta + \Theta\,dt$$

Or $\frac{P}{S\ \alpha}$ représente un flux d'énergie traversant une surface de coefficient α, ce quotient a donc les dimensions d'une température; en effet, $P = \alpha\ S\ \theta$

Posons : $\frac{P}{S\ \alpha} = \theta_m$ = constante (en régime)

$\frac{G\ C}{S\ \alpha} = \frac{G\ C\ \theta}{S\ \alpha\ \theta} = \frac{\text{Quantité de chaleur emmagasinée}}{\text{Flux de chaleur qui passe par unité de temps}}$

$\frac{G\ C}{S\ \alpha}$ a donc les dimensions d'un temps; posons :

$\frac{G\ C}{S\ \alpha} = T$ = constante

l'équation devient : $(\theta_m - \theta)\ dt = T\ d\theta$

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\theta}{\theta_m - \theta} \quad \text{et} \quad \int \frac{dt}{T} = \int \frac{d\theta}{\theta_m - \theta}$$

$$\frac{t}{T} = -\ \text{Log}\ (\theta_m - \theta) + A$$

Pour $t = 0 \quad \theta = 0 \quad A = \text{Log}\ \theta_m$

$$\frac{t}{T} = -\ \text{Log}(\theta_m - \theta) + \text{Log}\ \theta_m$$

$$\frac{t}{T} = \text{Log}\ \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta} \qquad e^{\frac{t}{T}} = \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta}$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\theta_m - \theta}{\theta_m} \qquad \text{d'où}$$

$$\boxed{\theta = \theta_m\ (1 - e^{-\frac{t}{T}})}$$

La courbe θ en fonction du temps est exponentielle, elle est asymptote à la droite $\theta = \theta_m$.

θ_m représente l'échauffement en régime ($t = \infty$)

La courbe passe par les points suivants :

t	T	3 T	4,6 T
θ	0,633 θ_m	0,95 θ_m	0,99 θ_m

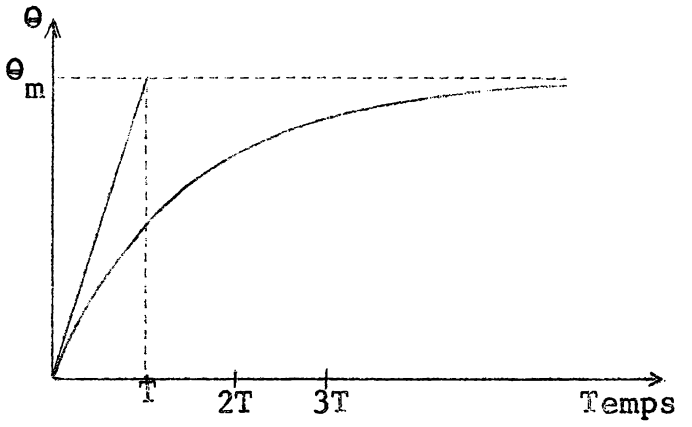


FIGURE 4

La tangente à l'origine a pour équation : $\theta = k\ t$ dont le coefficient angulaire k vaut :

$$k = \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=o}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \theta_m \left[\ \frac{1}{T} \quad e^{-\frac{t}{T}}\ \right] \quad \text{et} \quad \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=o} = \frac{\theta_m}{T}$$

La tangente à l'origine a pour équation : $\theta = \frac{\theta_m}{T}\ t$ elle passe par le point $(T,\ \theta_m)$.

En revenant aux données initiales, on trouve que $\frac{\theta_m}{T}$ vaut:

$$\frac{P\ S\ \alpha}{S\ \alpha\ G\ C} = \frac{P}{G\ C}$$

Dans un système d'axes $(\frac{d\theta}{dt}\ ,\ \theta)$ l'équation de la courbe d'échauffement s'écrit :

$$(\theta_m - \theta)\ dt = T\ d\theta \quad \text{ou} \quad \theta = \theta_m - T\ \frac{d\theta}{dt}$$

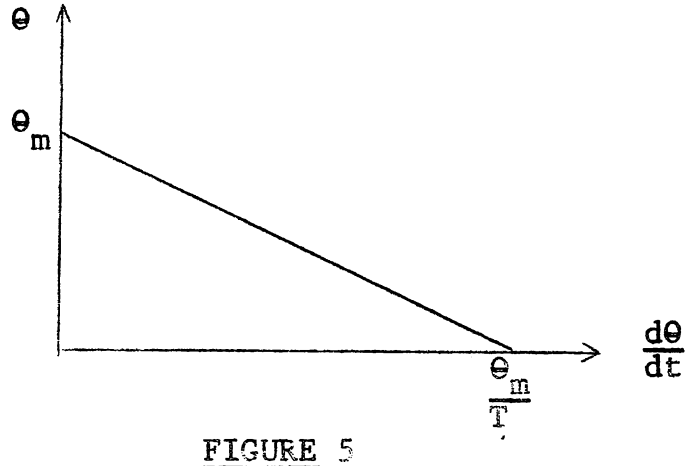


FIGURE 5

Ceci est l'équation d'une droite coupant l'axe des ordonnées en θ_m et l'axe des abscisses pour :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_m}{T}$$

Cette droite permet de calculer θ_m et T quand l'essai d'échauffement n'a pas permis d'atteindre l'état de régime.

3. LOI THEORIQUE DU REFROIDISSEMENT :

La machine a emmagasiné une quantité de chaleur G C θ, en se refroidissant elle rayonne de l'énergie (S α θ dt).

Exprimons que la chaleur rayonnée durant un temps dt est égale à la quantité de chaleur perdue pendant le même temps : G C dθ en valeur absolue mais de signe contraire.

$$G\ C\ d\theta = -\ S\ \alpha\ \theta\ dt$$

d'où en divisant par S α :

$$\frac{G\ C}{S\ \alpha}\ d\theta = -\ \theta\ dt$$

$$T\ d\theta = -\ \theta\ dt$$

En intégrant, il vient:

$$\int \frac{d\theta}{\theta} = -\int \frac{dt}{T}$$

$$-\frac{t}{T} = \text{Log}\ \theta + A$$

Pour $t = 0$ $\quad \theta = \theta_m$ d'où $A = -\text{Log}\ \theta_m$

$$-\frac{t}{T} = \text{Log}\ \theta - \text{Log}\ \theta_m = \text{Log}\ \frac{\theta}{\theta_m}$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\theta}{\theta_m} \quad \text{ou} \quad \theta = \theta_m\ e^{-\frac{t}{T}}$$

Ce qui est l'expression d'une exponentielle décroissante.

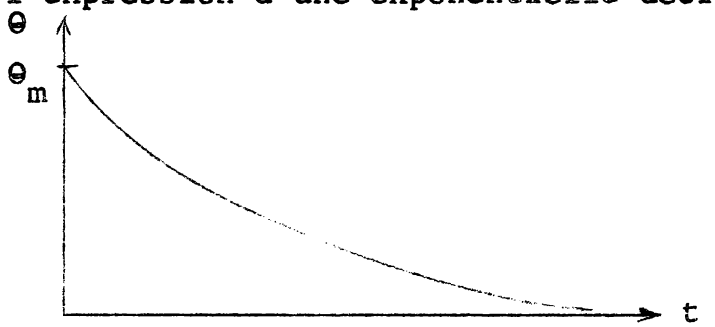


FIGURE 6

4. REMARQUES D'ORDRE PRATIQUE :

Des simplifications ont été appliquées qui ne sont pas réalisées dans la pratique :

a) Les pertes de la machine ne sont pas constantes, elles varient avec l'échauffement (exemple: effet Joule)

b) Le coefficient d'échange de chaleur avec le milieu ambiant varie avec l'échauffement.

La définition de la constante de temps, basée sur l'équation de l'échauffement en fonction du temps est donc approchée en raison des deux approximations introduites. En fait le calcul de la "constante de temps" effectué à partir d'une courbe réelle d'échauffement donne des valeurs croissantes au fur et à mesure que la machine s'échauffe.

La constante de temps augmente avec le rapport du volume à la surface :

$$T = \frac{G\ C}{S\ \alpha}$$

donc avec les dimensions de la machine. Elle varie par exemple de 15 minutes pour une petite machine à 40 minutes pour une grande. Elle diminue si la ventilation est meilleure (α augmente). Il en résulte que la constante de temps d'une machine rotative est plus faible à l'échauffement qu'au refroidissement (machine arrêtée).

La machine comprend des éléments de nature différente (cuivre, fer, isolant ...) possédant chacun une constante de temps propre. Ces éléments agissent l'un sur l'autre et en fait, la courbe d'échauffement est une somme de courbes exponentielles.

La capacité calorifique de la machine est une expression de la forme :

$$C = \frac{G_1\ C_1 + G_2\ C_2 + \ldots}{G_1 + G_2 + \ldots}$$

ou G_1 , G_2 représentent les poids des divers éléments, C_1 , C_2 les capacités calorifiques de chacun des éléments, peu importe si ces éléments sont ou non le siège de pertes.

La forme exponentielle de la courbe d'échauffement ou de refroidissement ne dépend pas de la température initiale, il est donc aisé d'évaluer la zone d'échauffement d'une machine soumise à une série de cycles comportant chacun une marche en charge et une marche à vide (figure 7).

5. SERVICE CONTINU ET SERVICE INTERMITTENT :

Une machine fonctionne en service continu, lorsque les périodes de travail sont suffisamment longues pour que l'échauffement de régime soit atteint.

En régime intermittent, les périodes de marche et d'arrêt alternent de telle manière que, d'une part la température de régime n'est pas atteinte pendant les périodes de marche et la température ambiante n'est pas non plus atteinte pendant les périodes d'arrêt. Les deux périodes sont du même ordre.

D'après les normes en vigueur, on définit un cycle d'une durée égale ou inférieure à 10 minutes qui est composé de deux laps de temps : une durée de marche et une durée d'arrêt.

On définit la durée relative de fonctionnement (D.F.) par le rapport entre la durée de marche et la durée totale du cycle.

On utilise souvent les D.F. 15% 25% 40% 60%. Le régime est atteint quand l'accroissement de température du à la marche est compensé par la diminution de la température à l'arrêt.

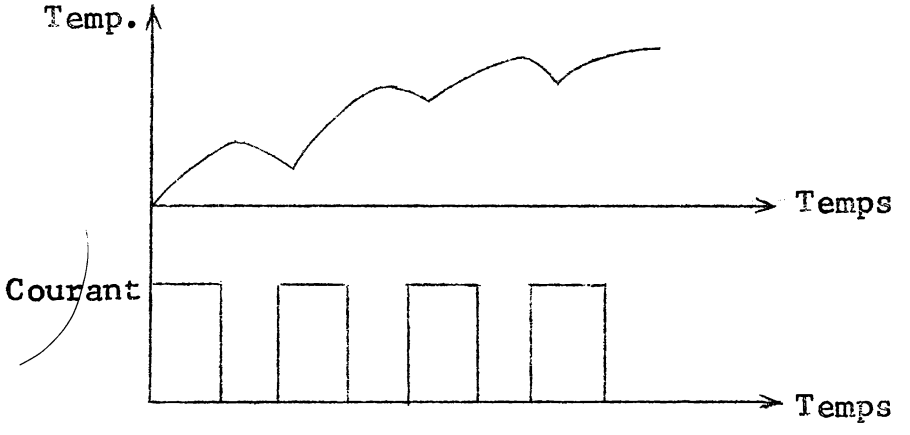


FIGURE 7

§ 3 . REFROIDISSEMENT DES MACHINES

1. VENTILATION ET PROTECTION MECANIQUE DES MACHINES :

On distingue :

- la machine ouverte : l'air extérieur pénètre librement
- la machine fermée : l'air extérieur circule dans les canalisations d'entrée et de sortie, éventuellement un dispositif de séchage de l'air est prévu pour empêcher l'introduction de l'humidité
- la machine hermétique : il n'y a aucune communication entre l'extérieur et l'intérieur. L'air intérieur circule en circuit fermé.

Le degré de protection mécanique se rapporte à la façon dont la machine est protégée contre :

- le contact avec les pièces sous tension
- le contact avec les pièces en mouvement
- l'introduction d'eau et de poussières et en général les corps étrangers.

2. MODE DE REFROIDISSEMENT :

Le mode de refroidissement indique dans quelles conditions le fluide réfrigérant assure l'évacuation des pertes. Le refroidissement est dit naturel lorsque le fluide, air ou huile circule naturellement par thermosiphon. Le refroidissement est forcé lorsque la circulation du fluide est imposée par un ventilateur ou une pompe.

Exemples pratiques :

- Machine auto-ventilée (à ventilateur incorporé) ou machine à ventilateur séparé, ce dernier cas étant appliqué dans les grosses machines telles que les turbo-alternateurs, les moteurs de locomotives électriques, etc ...
- Machine fermée ventilée
- Machine hermétique, à carcasse extérieure, refroidie par air soufflé
- Transformateur sec (à air, à refroidissement naturel)
- Transformateur à huile ; refroidissement de l'huile : naturel, par air soufflé, par circulation d'eau

L'efficacité du refroidissement par air dépend des degrés de fermeture et de protection mécanique. Ceux-ci sont souvent imposés par le local dans lequel fonctionne la machine : un local à atmosphère acide, poussiéreux exige une machine hermétique. Le refroidissement par air est plus efficient dans une machine ouverte que dans une machine hermétique. Les dimensions et le prix d'une machine varient avec le mode de protection mécanique, toutes autres choses égales d'ailleurs.

La puissance que l'on peut tirer d'une machine donnée est souvent limitée par l'échauffement, plus particulièrement par l'échauffement des isolants dont la durée de vie est fonction des températures atteintes.

Il faut que le fluide réfrigérant refroidisse toutes les parties de la machine qui sont le siège de pertes.

Les canaux de circulation du fluide dans les machines d'une certaine importance doivent faire l'objet de recherches détaillées pour fixer leur nombre, leur emplacement, leur orientation et leur section.

Dans les machines à ventilation forcée par air ou hydrogène, l'écoulement est le plus souvent turbulent en raison des variations brusques de section ou de direction.

Grâce à l'amélioration de la ventilation des machines, l'on est arrivé à augmenter leur puissance spécifique et à construire des machines très importantes pesant moins de 2 kg par kVA.

L'utilisation de matériaux améliorés, plus coûteux, des procédés de fabrication plus perfectionnés et de méthodes rigoureuses de contrôle, plus précises et plus sévères ont permis de réduire les pertes en particulier celles qui produisent des échauffements locaux dangereux. Car il ne suffit pas que l'échauffement moyen d'une machine soit acceptable, il faut éviter qu'il ne se produise des points chauds dangereux.

Dans le circuit magnétique d'un transformateur, les tiges de serrage doivent être bien isolées sous peine de créer des courants de court-circuit, qui peuvent échauffer le fer jusqu'à la fusion.

Il va de soi qu'un tel défaut doit être corrigé non pas par un refroidissement plus poussé mais par une meilleure construction.

3. VENTILATION DES MACHINES ROTATIVES :

Les ventilateurs centrifuges des turbos utilisés autrefois avaient un rendement inférieur à 40% par suite des grandes vitesses de l'air et des tourbillons importants. On utilise actuellement des ventilateurs hélicoïdaux dont le rendement est voisin de 80%.

La ventilation d'une machine rotative peut appartenir à l'une des trois conceptions suivantes: ventilation radiale, axiale ou mixte.

Dans la ventilation radiale, l'allure générale des filets d'air est radiale (figure 8). Deux ventilateurs en bout d'arbre chassent l'air sur les têtes des bobines. Dans le stator et le rotor, des canaux radiaux font office de ventilateur.

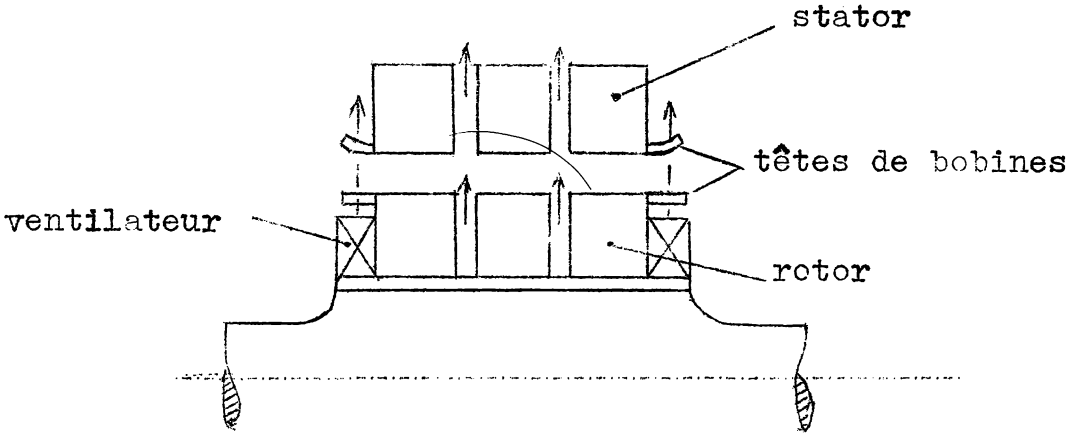


FIGURE 8

La ventilation radiale exige de grandes quantités d'air, les surfaces de refroidissement étant relativement petites, et il n'est pas possible d'utiliser un échauffement de l'air supérieur à 7 ou 8°C entre l'entrée et la sortie. La longueur axiale est augmentée par les ventilateurs.

La ventilation axiale (figure 9) où l'allure des filets d'air est axiale, est utilisée dans les machines de puissance moyenne et permet d'utiliser des échauffements d'air de 10 à 15°C. Les surfaces d'échange sont plus grandes; ce procédé permet de refroidir des machines dont la longueur axiale maximum est de 600 à 700 mm.

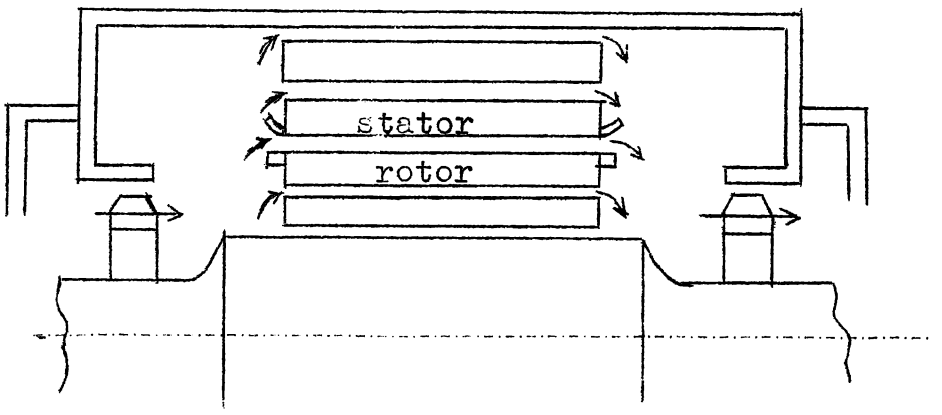


FIGURE 9

La ventilation mixte (figure 10) est une combinaison des deux précédentes, réalisée de telle manière que les longueurs de circulation axiale de l'air ne soient pas supérieures à 500 mm.

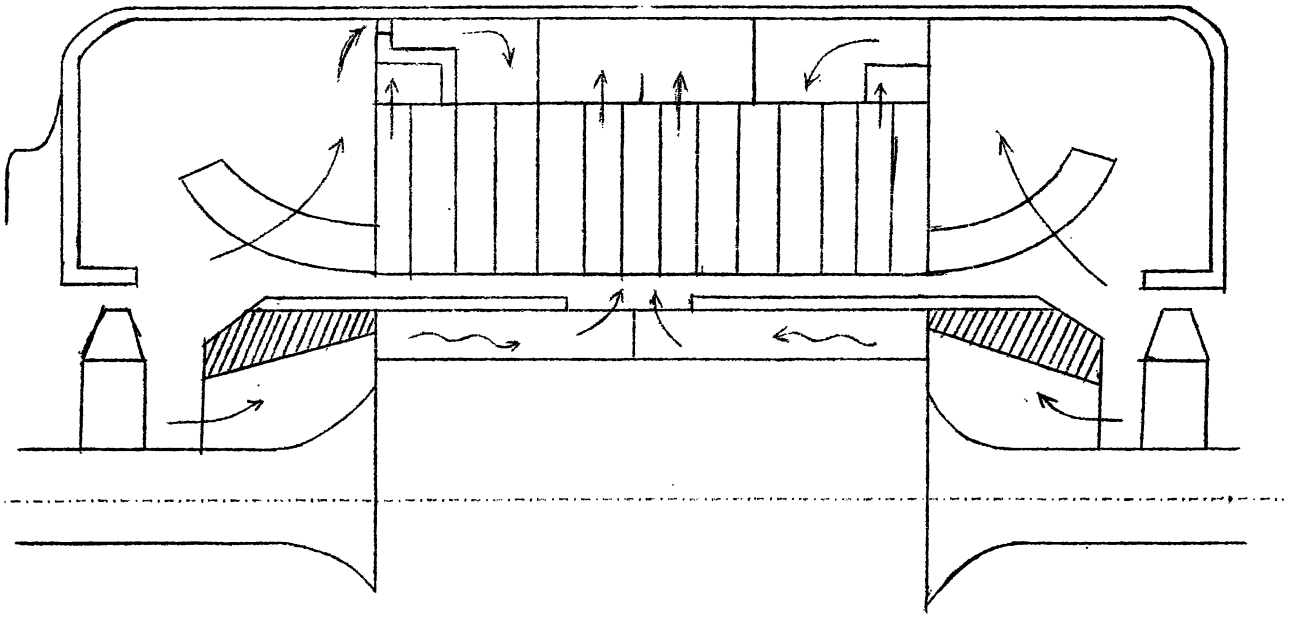


FIGURE 10

La machine est subdivisée en compartiments indépendants, dont un sur deux est alimenté en air frais, l'autre évacuant directement l'air chaud. Habituellement, il y a un ventilateur à chaque bout. La longueur axiale de la machine n'est pas limitée par le problème de la ventilation.

Dans les grosses machines, les ventilateurs sont extérieurs et souvent logés dans les fondations. Il est nécessaire de prévoir des filtres pour arrêter les poussières en raison des grosses quantités d'air brassées (exemple : pour 30 MVA, il faut de l'ordre de 1.700 kg d'air/minute).

4. VENTILATION A L'HYDROGENE :

L'hydrogène est un fluide réfrigérant meilleur que l'air, car il est 14 fois plus léger, sa chaleur spécifique par m^3 est double, et sa conductibilité calorifique est plus grande.

Il assure un refroidissement plus énergique, et les ventilateurs absorbent une puissance plus faible. Avec l'hydrogène la formation d'ozone est exclue, ce qui élimine un facteur de destruction des isolants.

Il faut assurer l'étanchéité complète de la carcasse et du rotor, pour éviter soit les fuites d'hydrogène, soit les rentrées d'air et la formation d'un mélange détonnant.

Les joints à l'huile réalisent l'étanchéité, mais sont coûteux. L'emploi de l'hydrogène ne se justifie que pour les puissances supérieures à 60 ou 70 MVA.

5. REFROIDISSEMENT DES TRANSFORMATEURS :

L'emploi de l'huile minérale est généralisée pour le refroidissement des transfos de moyenne et grande puissance. Elle donne des coefficients d'échange de chaleur par convection, valant de l'ordre de 10 fois ceux de l'air. De plus, l'huile facilite l'isolement.

Des canaux verticaux et horizontaux laissent pénétrer l'huile au coeur même des enroulements et des circuits magnétiques, là où les pertes sont produites (Quatrième partie : TRANSFORMATEURS).

§ 4 . GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE L'ECHAUFFEMENT

On se propose de rechercher quelles sont les grandeurs qui jouent un rôlé essentiel dans l'échauffement des machines électriques.

On se borne ici à traiter quelques cas particuliers d'échauffement du fer et du cuivre à l'état de régime, en admettant la loi approximative d'échange de chaleur avec l'ambiance par convection et rayonnement (voir paragraphe précédent) :

$$P = \alpha \; S \; \Delta\theta$$

PERTES PAR EFFET JOULE

EXEMPLE I : Enroulement inducteur de machine CC

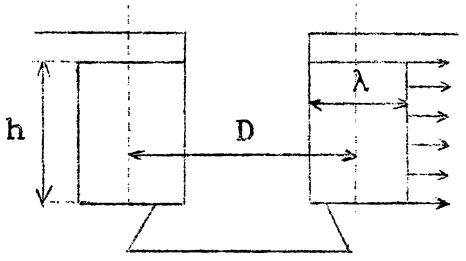


FIGURE 11

Soient :

D = diamètre moyen du bobinage
h = hauteur du bobinage
λ = épaisseur du bobinage
N = nombre de spires
I = courant
s = section d'un conducteur
J = densité de courant

$$P = \rho \frac{1}{s} I^2 = \rho \frac{N \pi D}{s} I^2 = \rho . J . \pi . D . N . I$$

En admettant que seule la surface cylindrique extérieure participe à l'échange de chaleur :

$$S = \pi (D + \lambda) . h$$

la quantité de chaleur évacuée vaut:

$$P = \alpha \pi (D + \lambda) h . \Delta\theta$$

A l'état de régime :

$$\Delta\theta = \frac{\rho.J.\pi.D.N.I}{\alpha.\pi(D+\lambda).h} = \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)\left(\frac{D}{D+\lambda}\right)\left(\frac{N\,I}{h}\right) J$$

Les deux derniers termes entre parenthèses sont des constantes de construction de la machine.

L'échauffement de l'enroulement dépend essentiellement de la densité de courant et du nombre d'ampères-tours par cm de hauteur de bobine, et augmente avec ces grandeurs.

La conclusion est valable pour les enroulements d'électro-aimants et de transformateurs.

EXEMPLE II : Enroulement réparti dans les encoches (figure 12)

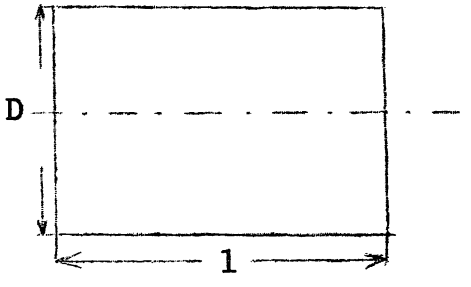


FIGURE 12

Soient D le diamètre de la machine
1 la longueur de la machine
N le nombre de conducteurs
s la section d'un conducteur
I le courant

$$P_J = \rho \frac{N\,1}{s} I^2 = \rho\, 1\, N\, I\, J$$

Or la surface de refroidissement vaut :

$$\pi\, D\, 1$$

d'où $\rho\, 1\, N\, I\, J = \pi\, D\, 1\, \alpha\, \Delta\theta°$

et

$$\Delta\theta = \frac{\rho}{\alpha}\frac{N\,I}{\pi\,D} J$$

L'échauffement est proportionnel

- à la densité de courant J
- $\frac{\text{aux ampères conducteurs}}{\text{par m de périphérie}} = \frac{N\,I}{\pi\,D}$

Cette relation suppose que toutes les calories sont évacuées par la surface latérale de la machine.

Cette loi vaut aussi pour les stators des machines asynchrones.

==========

C H A P I T R E I I

THEORIE , CALCULS , TECHNOLOGIE DES ELECTRO-AIMANTS ET DES RELAIS

§ 1 . RAPPEL DE LOIS FONDAMENTALES

1. Cas d'un circuit magnétique fermé, sans entrefer plongé dans un fluide imperméable au flux
2. Cas d'un circuit magnétique avec entrefer
3. Méthode pratique de calcul
4. Problèmes
5. Cas d'un circuit magnétique plongé dans un fluide perméable au flux
6. Détermination du flux total à créer

§ 2 . LES ELECTRO-AIMANTS ALIMENTES EN COURANT CONTINU

1. Calcul de la force d'attraction exercée sur l'armature mobile
2. Détermination des ampères-tours totaux à prévoir
3. Détermination de l'enroulement et théorèmes relatifs à l'enroulement
4. Vérification de l'échauffement
5. Données pratiques
6. Exemple de calcul d'un électro-aimant

§ 3 . LES ELECTRO AIMANTS ALIMENTES EN COURANT ALTERNATIF

1. Calcul de la force d'attraction
2. Amortissement des vibrations
3. Variation de l'effort dans un électro-aimant à grande course
4. Variation de l'effort dans un électro-aimant à faible course

5. Constance du flux dans un électro-aimant alimenté par une source sinusoïdale
6. Théorèmes relatifs à l'enroulement alimenté par une tension alternative
7. Comparaison entre les électro-aimants à courant continu et à courant alternatif
8. Calcul d'un électro-aimant alimenté par une source alternative

§ 4 . TECHNOLOGIE

1. Type d'électro-aimants
2. Définitions relatives aux relais
3. Cycle magnétique d'un relais

§ 1 . RAPPEL DE NOTIONS FONDAMENTALES

1. CAS D'UN CIRCUIT MAGNETIQUE FERME, SANS ENTREFER PLONGE DANS UN FLUIDE IMPERMEABLE AU FLUX :

Considérons le tore (figure1)constitué d'une matière perméable au flux, mais plongé dans une matière imperméable au flux.

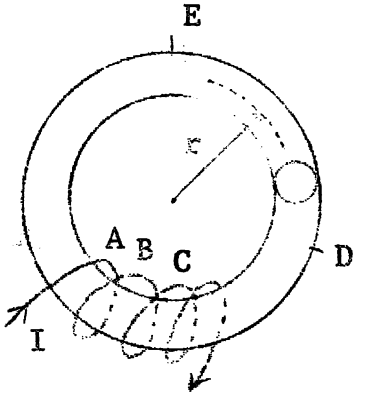


FIGURE 1

Toutes les lignes de force engendrées par le passage du courant dans les spires bobinées sur le tore resteront donc dans le tore.

Le flux créé Φ vaut :

$\mathcal{F}/\mathcal{R}$ ou $\mathcal{F}\,P$

où $\mathcal{F}$ représente la <u>force magnétomotrice</u> :

$$\mathcal{F} = N\,I$$

où N représente le nombre de spires parcourues par le courant I

et où $\mathcal{R}$ représente la <u>réluctance</u> tandis que P représente l'inverse de la réluctance appelée aussi la <u>perméance</u>.

L'on se rappelle que : $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu \quad S}$ c'est-à-dire que la réluctance est :

- proportionnelle à la longueur du circuit magnétique (dans le cas présent $1 = 2\pi\ r$)
- inversément proportionnelle à la section du circuit magnétique

Le coefficient μ représente la <u>perméabilité</u> du métal du tore.

Afin de réaliser une meilleure compréhension intuitive de la notion de force magnétomotrice portons en graphique, figure 2 la variation de la force magnétomotrice en fonction de la distance à un point repère.

Prenons comme origine le point A et portons en ordonnée la différence de la force magnétomotrice existant entre les points B, C, D, E et le point A.

La force magnétomotrice croit de A à C, décroit de C à E pour revenir en A à sa valeur initiale.

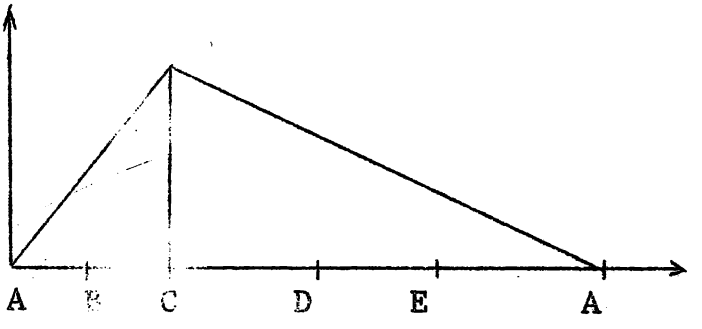


FIGURE 2

La force magnétomotrice joue donc le rôle d'une source de tension; tandis que la réluctance joue le rôle d'une résistance.

On a donc les éléments suivants du diptyqye de comparaison analogique :

CIRCUIT MAGNETIQUE		CIRCUIT ELECTRIQUE
Flux	⇌	Courant
Force magnétomotrice	⇌	Tension
Réluctance	⇌	Résistance

2. CAS D'UN CIRCUIT MAGNETIQUE AVEC ENTREFER DE PERMEABILITE :

Considérons le tore plongé dans un milieu imperméable au flux sauf dans le voisinage de l'entrefer où la perméabilité sera celle de l'air. Le coefficient de perméabilité dans l'air vaut : μ_o.

La réluctance de l'entrefer vaut :

$$\frac{l_e}{\mu_o \quad S}$$

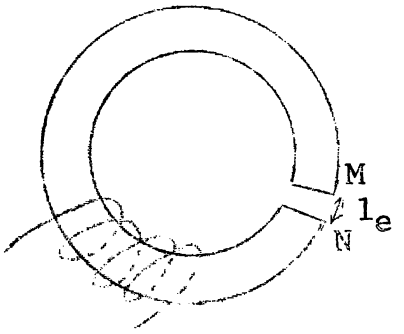


FIGURE 3

Entre les faces M et N de l'entrefer, il règne une force magnétomotrice :

$$\mathcal{F}_e$$

Le flux Φ qui circule dans l'entrefer vaut :

$$\Phi = \frac{\mu_o \mathcal{F}_e S}{l_e}$$

d'où l'on tire :

$$\mathcal{F}_e = \frac{\Phi l_e}{\mu_o S} = B_e \frac{l_e}{\mu_o}$$

Comme on a supposé que le tore était plongé, sauf au voisinage de l'entrefer, dans un milieu imperméable au flux, le flux Φ est également celui qui circule dans tout le tore.

Appelons $\mathcal{R}$ la réluctance du tore à l'exception de la partie relative à l'entrefer.

La force magnétomotrice correspondante vaut $\Phi \cdot \mathcal{R}$

La force magnétomotrice totale nécessaire à la circulation du flux dans l'ensemble vaut :

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_e + \Phi \mathcal{R}$$

Soit l_t la longueur du tore de perméabilité μ_t :

$$\Phi \mathcal{R} = \frac{B S l_t}{\mu_t S} = B \frac{l_t}{\mu_t}$$

d'où $$\mathcal{F} = \frac{B_e l_e}{\mu_o} + \frac{B l_t}{\mu_t} \qquad (1)$$

D'une façon générale $$\mathcal{F} = \int \frac{B}{\mu} \, dl$$

Le coefficient μ_o dans l'air vaut $4 \pi . 10^{-7}$. Dans l'acier il vaut beaucoup plus, il peut être déduit des courbes d'induction des tôles.

Remarque générale très importante :

En raison de la saturation variable avec l'induction, il n'est pas permis d'additionner algébriquement d'une part des forces magnétomotrices et d'autre part les flux partiels correspondants agissant sur le même noyau.

Exemple :

$$\Phi_1 = \frac{\mathcal{F}_1}{\mathcal{R}_1} \qquad \Phi_2 = \frac{\mathcal{F}_2}{\mathcal{R}_2}$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 < \frac{\mathcal{F}_1}{\mathcal{R}_1} + \frac{\mathcal{F}_2}{\mathcal{R}_2}$$

3. METHODE PRATIQUE DE CALCUL :

De l'équation (1) l'on déduit aisément une méthode générale de calcul d'une force magnétomotrice.

Considérons un circuit magnétique composé de plusieurs éléments dans lesquels règnent respectivement les inductions B_1 , B_2 , B_3 correspondant à des perméabilités μ_1 , μ_2 , μ_3 et des longueurs l_1 , l_2 , l_3 suivies d'un entrefer de longueur l_e dans lequel règne une induction B_e.

La force magnétomotrice totale $\mathcal{F}$ vaut :

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_3 + \mathcal{F}_e$$

$$\mathcal{F} = \frac{B_1\, l_1}{\mu_1} + \frac{B_2\, l_2}{\mu_2} + \frac{B_3\, l_3}{\mu_3} + \frac{B_e\, l_e}{\mu_o}$$

Induction en Wéber/m^2	Ampères-tours nécessaires par mètres			
	Fonte	Fonte malléable	Acier coulé	Acier Sandvick
0,2	500		100	60
0,4	800		200	80
0,6	1600	600	300	1 00
0,8	4400	800	400	1 45
1	12000	1400	500	1 90
1,1	17000	2200	600	2 25
1,2		4000	800	2 90
1,3		7400	1000	3 80
1,4		11600	1400	5 30
1,5		17000	2000	8 00
1,6			3100	
1,7			5000	
1,8			8400	
1,9			14000	

4. PROBLEMES :

a) Connaissant un circuit magnétique, les courbes d'induction des matériaux utilisés, calculer les ampères-tours nécessaires pour obtenir un flux déterminé.

La méthode exposée ci-dessus permet de calculer aisément les ampères-tours nécessaires à la production de l'induction dans chaque partie du circuit. Il suffit de faire la somme des ampères-tours relatifs à chaque tronçon de circuit pour obtenir la valeur totale de la force magnétomotrice à créer

b) Connaissant les ampères-tours totaux excitant un circuit magnétique calculer le flux produit.

Si le circuit magnétique est composé de plusieurs tronçons de perméabilité différente ou de section différente le problème doit être résolu par tâtonnement.

On suppose Φ_1 le flux produit, on détermine pour chaque tronçon les inductions correspondantes, puis on calcule pour chaque tronçon les ampères-tours qui seraient nécessaires pour réaliser le passage du flux supposé. On compare la somme des ampères-tours ainsi obtenue à la valeur réelle.

Si la somme totale des ampères-tours calculés est supérieure à la valeur réelle des ampères-tours, on recommence les calculs en partant d'un flux moindre. Sinon on fera l'inverse.

Par tâtonnements successifs sur la valeur de Φ_1, on se rapprochera ainsi toujours plus près de la solution exacte.

5. CAS D'UN CIRCUIT MAGNETIQUE PLONGE DANS UN FLUIDE PERMEABLE AU FLUX :

L'exposé ci-dessus est incomplet. En effet, le circuit magnétique est généralement plongé dans l'air ou l'huile, fluides perméables au flux, ce qui provoque des pertes magnétiques.

Considérons le circuit magnétique de la figure 4 :

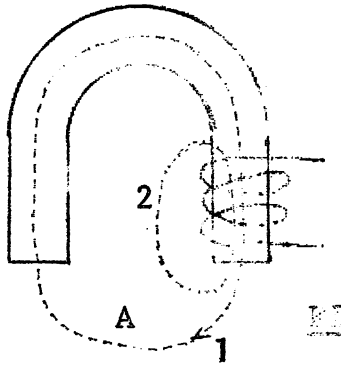


FIGURE 4

Dessinons quelques lignes de force.

La ligne 1 passe par l'entrefer A. La ligne 2 ne passe pas par l'entrefer, elle est donc nuisible car elle augmente la valeur de l'induction dans le noyau, mais ne provoque aucune induction dans l'entrefer A.

L'accroissement de l'induction dans le noyau nécessite un accroissement de la force magnétomotrice. Pour ramener le cas réel au cas idéal exposé précédemment, il faut donc tenir compte des pertes de flux notamment dans le calcul de :

$$\mathcal{F} = \int \frac{B}{\mu} \, dl$$

Le calcul est aisé dans un certain nombre de cas, dans d'autres cas la détermination des ampères-tours doit être réalisée empiriquement.

6. DETERMINATION DU FLUX TOTAL A CREER :

Appelons Φ le flux qui passe par A(figure 4) c'est le flux utile.

Appelons V Φ le flux total engendré par les ampères-tours.

La différence $\Phi(V - 1)$ représente les pertes de flux magnétique.

Pour calculer le flux de fuite on peut procéder de la façon suivante lorsqu'on ne dispose pas de résultats empiriques. On trace au jugé les lignes de force qui s'échappent de la zone utile et on calcule la réluctance correspondante en supposant nulle la réluctance de la partie des lignes de force qui passe par le noyau.

On détermine ensuite la force magnétomotrice à l'entrée et à la sortie du noyau pour ces lignes de force, on calcule ainsi le flux de fuite par la formule connue :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

Dans certains cas, l'on peut faire usage de formules empiriques en supposant que les surfaces entre lesquelles on recherche le flux de fuite sont des surfaces équipotentielles au point de vue électromagnétique.

a) Cas de deux surfaces parallèles planes.

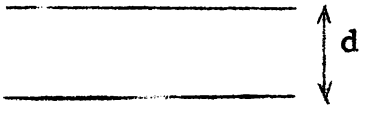


FIGURE 5

La perméance vaut $\frac{\mu_o S}{d}$

Cette formule est valable dans le cas de surfaces égales ou sensiblement égales.

b) Cas de deux surfaces planes situées dans un même plan.

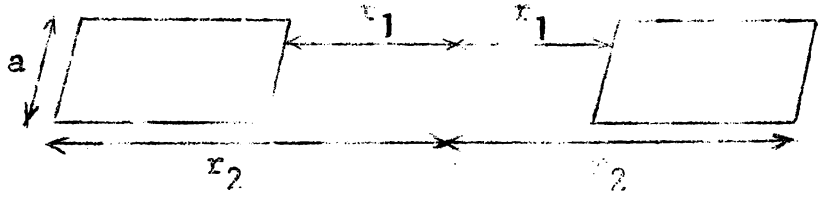


FIGURE 6

La perméance vaut: $2{,}3\ \mu_o \frac{a}{\pi} \text{Log} \frac{r_2}{r_1}$

c) Cas de deux surfaces éloignées situées dans un même plan.

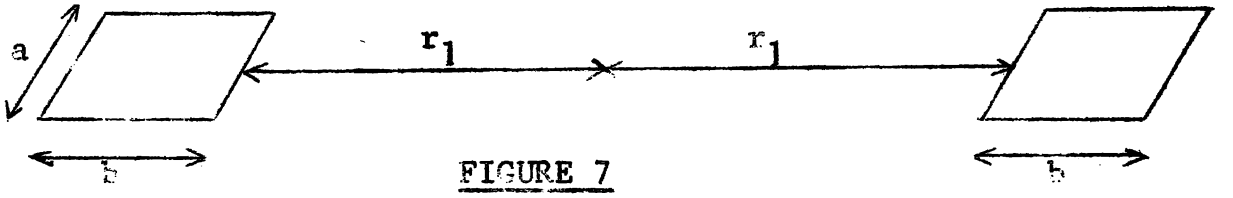


FIGURE 7

La perméance vaut: $2{,}3\ \mu_o \frac{a}{\pi} \text{Log} \frac{\pi\, b + 2\, r_1}{2\, r_1}$

d) Cas de deux cylindres parallèles de longueur L.

La perméance vaut:

$$\frac{\mu_o 2\ \pi\ L}{2{,}3\ \text{Log}(u + \sqrt{u^2-1})}$$

où :

$$u = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2\ r_1\ r_2}$$ dans le cas de cylindres extérieurs

$$u = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2\ r_1\ r_2}$$ dans le cas de cylindres intérieurs

r_1 et r_2 représentent les rayons des bases des cylindres et
d la distance entre les axes des cylindres.

Si les cylindres sont égaux extérieurs et assez éloignés:

$$d \quad 3\,r$$

la perméance vaut :

$$\frac{\mu_o \pi L}{2{,}3 \operatorname{Log} \frac{d}{r}}$$

Si les cylindres intérieurs sont coaxiaux:

$$r_2 > r_1$$

$$P = \mu_o \frac{2 \pi L}{2{,}3 \operatorname{Log} \frac{r_2}{r_1}}$$

e) Cas d'un cylindre et d'un plan parallèle à l'axe du cylindre.

La perméance vaut:

$$P = \mu_o \frac{2 \pi L}{2{,}3 \operatorname{Log} \frac{d}{2\,r}}$$

en appelant d la distance de l'axe du cylindre au plan.

§ 2 . LES ELECTRO-AIMANTS ALIMENTES EN COURANT CONTINU

1. CALCUL DE LA FORCE D'ATTRACTION EXERCEE SUR L'ARMATURE MOBILE :

Considérons l'électro-aimant de la figure 8 dont l'entrefer vaut x .

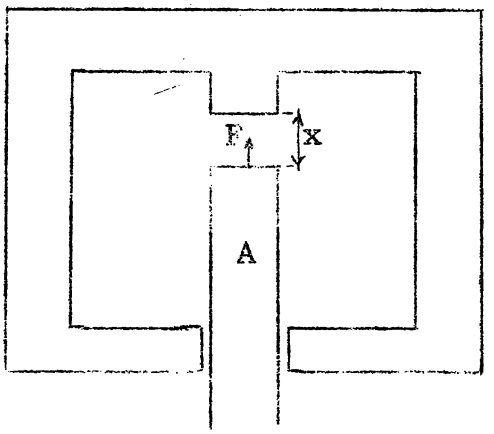


FIGURE 8

Appelons F la force d'attraction exercée sur le noyau A. N le nombre de spires de l'enroulement, I le courant qui les parcourt.

Considérons une position quelconque de l'armature A ; à ce moment l'entrefer vaut x, l'énergie électrique dans la self vaut :

$$\frac{L\ I^2}{2}$$

Lorsque le noyau se déplace d'une façon infinitésimale la force F reste constante et le travail qui correspond à ce déplacement vaut F dx , par contre l'énergie due à ce travail a été fournie par une réduction de la self de l'enroulement, la réduction de cette énergie vaut :

$$\frac{d\ LI^2}{2}$$

mais comme le courant est constant, cette réduction vaut :

$$\frac{I^2}{2}\ dL$$

Exprimons que l'énergie totale du système reste constante :

$$F\,dx + \frac{I^2}{2}\,dL = 0$$

d'où $$F = -\frac{I^2}{2}\,\frac{dL}{dx}$$

Calculons L

Partons de l'équation : $\Phi = N\,I\,P$

Or : $L = N\,\frac{\Phi}{I} = N^2\,P$

Mais $P = \mu_o \frac{S}{x}$ d'où : $L = \mu_o \frac{N^2\,S}{x} = 4\,\pi.10^{-7}\,\frac{N^2\,S}{x}$

D'où $F_{\text{en newtons}} = -\frac{I^2}{2}.\,4\pi.10^{-7}\,N^2\,\frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$

Exprimons F en kg : (1 Newton = 0,102 kg)

$$F = -\frac{I^2}{2}\,4\pi\,10^{-7}\,N^2.\,0{,}102\,\frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

D'où en valeur absolue :

$$F_{\text{en kg}} = 6{,}4.10^{-8}(N\,I)_e^2\,\frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

En fait tout le raisonnement a été basé sur la variation de perméance dans l'entrefer, or la perméance a été modifiée également dans le noyau magnétique. Nous tiendrons donc compte du fait que les ampères-tours nécessaires à la circulation du flux dans le circuit magnétique ne jouent aucun rôle en corrigeant la formule précédente : on ne considérera que les ampères tours nécessaires à la production du flux dans l'entrefer en affectant ces ampères-tours de l'indice e.

La formule précédente peut être simplifiée lorsque l'entrefer est constitué de deux surfaces planes parallèles. En effet :

$$P = \mu_o \frac{S}{x} \qquad \frac{dP}{dx} = -\frac{S}{x^2}\,\mu_o$$

Le coefficient μ_o a déjà été incorporé dans la formule ,

d'où :

$$F_{\text{en kg}} = 6{,}4.10^{-8}(NI)_e^2 \frac{S}{x^2} \quad \text{en valeur absolue}$$

Or $\Phi = N\ I\ P = N\ I \frac{S}{x} \mu_o$

d'où : $N\ I = \frac{\Phi}{S} \frac{x}{\mu_o}$

La formule devient :

$$F_{\text{en kg}} = 6{,}4.10^{-8} \frac{\Phi^2}{S^2} \frac{x^2}{\mu_o^2} \frac{S}{x^2}$$

qui après simplification devient en notant que $\frac{\Phi}{S} = B$

$$F_{\text{en kg}} = \frac{6{,}4\ .10^{-8}\ B^2\ S}{\mu_o^2} = \frac{6{,}4.10^{-8}.10^{14}.\ B^2\ S}{(4\pi)^2}$$

$$\boxed{F_{\text{en kg}} = 4{,}07.10^{+4}\ B^2\ S}$$

Dans cette formule B est exprimé en wéber par m^2 et S en m^2.

L'attraction par cm^2 vaut : $\frac{F}{S} = 4{,}07\ B^2$ où B est exprimé en Wéber/m2.

Exemple d'application: ELECTRO-AIMANT A NOYAU PLONGEUR

Examinons le cas d'un noyau plongeur dont la face active est un cône tronqué (figure 9).

Une matière élastique d'épaisseur b amortit le choc en fin de course.

Pour déterminer l'effort F, il faut déterminer la variation de perméance.

Le flux peut cheminer suivant deux itinéraires :

1) la direction 1

2) la direction 2

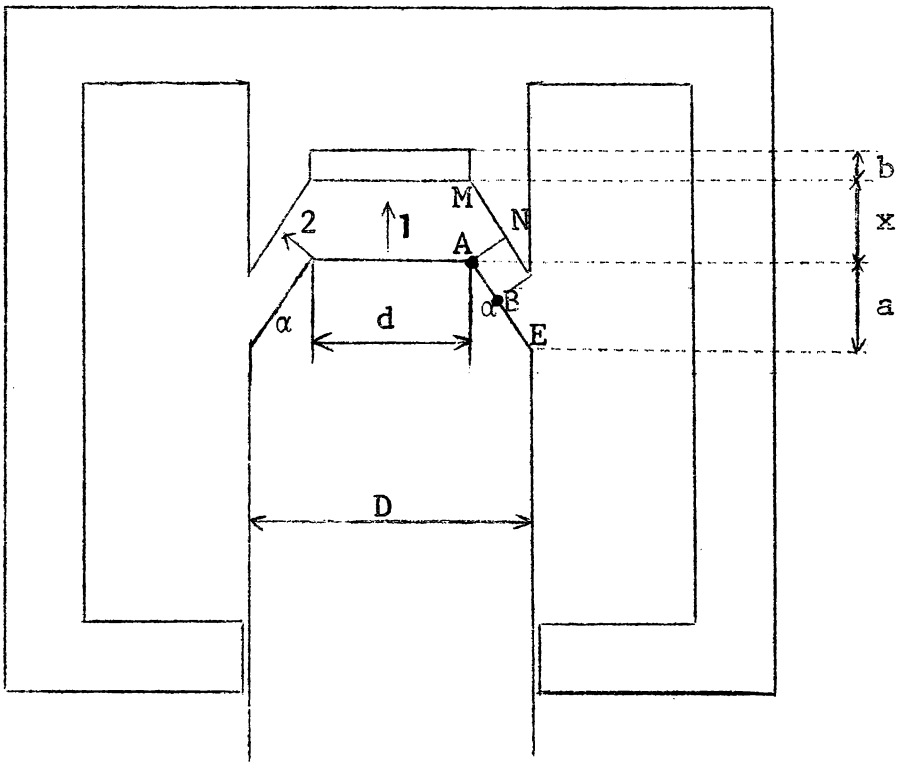


FIGURE 9

Appliquons la formule générale:

$$F_{kg} = 6{,}4.10^{-8}\ (N\ I)_e^2\ \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

successivement aux deux flux correspondant à chaque itinéraire.

Le flux 1 correspond à la perméance P_1 qui a comme valeur:

$$P_1 = \mu_o \frac{S_1}{x+b}$$

Or $S_1 = \frac{\pi}{4} d^2$ d'où $\frac{S_1}{x_1}$ dans le cas présent vaut :

$$\frac{\pi\ d^2}{4(x + b)}$$

Le flux 2 correspond à la perméance P_2.

La surface qui définit P_2 est comprise entre les normales à la surface du tronc de cône comme représenté à la figure 9 :

$$S_2 = AB \cdot \pi \, d_{moyen}$$

En pratique l'on admet : $d_{moyen} = \frac{D + d}{2}$

cette hypothèse est d'autant plus vraie que le noyau est plus proche de la fin de course.

Par la géométrie élémentaire, on trouve successivement:

$$AB = AE - BE \qquad AE = \frac{a}{\cos \alpha} \qquad BE = MN = x \cos\alpha$$

d'où : $$AB = \frac{a}{\cos \alpha} - x \cos \alpha$$

La distance x_2 qui correspond à la perméance P_2 vaut : $x \sin \alpha$; d'où :

$$\frac{S_2}{x_2} = \frac{\pi \, d_{moyen} \, (\frac{a}{\cos \alpha} - x \cos \alpha)}{x \sin \alpha}$$

La perméance totale P vaut $P_1 + P_2$, mais on néglige P_1 devant P_2.

L'effort F vaut alors :

$$F_{kg} = 6{,}4.10^{-8} \, (N \, I)_e^2 \, \frac{d(\frac{S_2}{x_2})}{dx}$$

$$\frac{d(\frac{S_2}{x_2})}{dx} = - \frac{\pi \, d_{moyen} \, a}{x^2 \sin \alpha \cos \alpha}$$

et en valeur absolue = $$\frac{a \, \pi \, d_{moyen}}{x^2 \sin \alpha \cos \alpha}$$

d'où F_{kg} en valeur abs. $= \frac{6{,}4.10^{-8} \, (N \, I)_e^2 \, a \, \pi \, d_{moyen}}{x^2 \sin \alpha \cos \alpha}$

Unité: I en ampères

Remarquons également que cette formule est indépendante de l'unité de longueur choisie.

Remarquons aussi que la force d'attraction est toutes choses égales inversément proportionnelle au carré de la longueur d'entrefer.

Cas particuliers:

a) Cône non tronqué

Ce qui signifie : $d_{moyen} = \frac{D}{2}$

$$a = \frac{D}{2} \cot g\ \alpha$$

$$F = \frac{6{,}4.10^{-8}(N\ I)_e^2\ \pi}{x^2 \sin \alpha \cos \alpha} \cdot \frac{D \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \cdot \frac{D}{2}$$

$$F = \frac{6{,}4.10^{-8}(N\ I)_e^2}{x^2 \sin^2 \alpha} \cdot S_{noyau}$$

b) Cas de faible course

Dans ce cas x cos α est négligeable devant $\frac{a}{\cos \alpha}$ il vient donc :

$$\frac{S_2}{x_2} = \frac{\pi\ d_{moyen}\ a}{x \cos \alpha \sin \alpha}$$

En introduisant : $d_{moyen} = \frac{D}{2}$ et $a = \frac{D}{2} \cot g\ \alpha$ il vient :

$$\frac{S_2}{x_2} = \frac{\pi}{x \cos \alpha \sin \alpha} \frac{D}{2} \frac{D \cos \alpha}{2 \sin \alpha} = \frac{S}{x \sin^2 \alpha}$$

en valeur absolue :

$$\frac{d(\frac{S_2}{x_2})}{dx} = \frac{S}{x^2 \sin^2 \alpha}$$

$$F_{kg} = \frac{6{,}4.10^{-8}(N\ I)_e^2\ S}{x^2 \sin^2 \alpha}$$

$$\text{Or} \quad \Phi = N\,I\,P = \frac{N\,I\,\mu_o S_2}{x_2}$$

$$\text{d'où} \quad N\,I = \frac{\Phi\,x_2}{\mu_o S_2} \quad \text{et} \quad F = \frac{6{,}4.10^{-8}\,\Phi^2\,x_2^2\,S}{x^2\,\sin^2\alpha\,\mu_o^2\,S_2^2}$$

$$\text{Or} \quad \frac{S_2}{x_2} = \frac{S}{x\,\sin^2\alpha} \qquad \mu_o = 4\,\pi\,10^{-7}$$

$$\text{d'où :} \quad F_{kg} = \frac{6{,}4.10^{-8}\,\Phi^2\,x^2\,\sin^4\alpha\;S\;10^{14}}{x^2\,\sin^2\alpha\,(4\pi)^2\,S^2}$$

$$\boxed{F_{kg} = 4{,}07.10^4\,B_e^2\;S\,\sin^2\alpha}$$

Ceci n'est valable que pour une faible course :

$$x\cos\alpha \ll \frac{a}{\cos\alpha}$$

F est exprimé en kg

B est exprimé en Wéber/m^2

S est exprimé en m^2

c) Cas d'un noyau plan $\alpha = 90°$

$$\boxed{F_{kg} = 4{,}07.10^4\,B_e^2\,S}$$

Dans un noyau plan, x cos α est nul ; on retrouve la formule générale pour un noyau plat.

COMPARAISON ENTRE LES DEUX FORMES DE NOYAU

1) La formule de l'effort vaut respectivement :

Noyau cônique: $F = 4{,}07.10^4\,B_e^2\,S\,\sin^2\alpha$

Noyau plat : $F = 4{,}07.10^4\,B_e^2\,S$

Supposons B_e S identiques.

Le noyau plat permettra de dréer une force plus importante que ne le permet le noyau cônique et cela d'autant plus que le cône est pointu.

2) Considérons la formule :

$$F = \frac{6{,}4.10^{-8}(N\ I)_e^2\ S}{x^2\ \sin^2\alpha}$$

Supposons F, N I et S identiques, c'est-à-dire que les deux enroulements sont identiques. Au début de la course, ils développent le même effort F.

Il en résulte que pour les deux électro-aimants, on a :

$$\frac{6{,}4.10^{-8}\ (N\ I)_e^2\ S}{x_1^2\ \sin^2\alpha} = \frac{6{,}4.10^{-8}\ (N\ I)_e^2\ S}{x_2^2}$$

en appelant x_1 et x_2 les courses du noyau conique et du noyau plat.

D'où : $x_1^2 \sin^2\alpha = x_2^2$

La course du noyau plat x_2 sera donc plus petite que celle du noyau conique.

Le noyau conique est donc indiqué pour les grandes courses.

2. DETERMINATION DES AMPERES-TOURS A PREVOIR :

Le calcul précédent a permis de déterminer $(N\ I)_e$ c'est-à-dire les ampères-tours efficacement utilisés pour la production d'une force déterminée sur le noyau dont l'entrefer est également donné.

Les ampères-tours à créer sont plus importants pour deux raisons car le calcul précédent n'a pas tenu compte de la réluctance du circuit magnétique ni des pertes de flux qui diminuent le coefficient μ du métal.

a) Effet de la réluctance du circuit magnétique

L'on a vu que dans un tore plongé dans un milieu imperméable au flux, la force magnétomotrice à prévoir pour réaliser une induction B dans l'entrefer vaut :

$$\mathcal{F} = \int \frac{B}{\mu} \, dl$$

Du point de vue réluctance, cette formule est applicable dans le cas présent à condition de considérer tout le circuit magnétique comme équivalent au circuit du tore.

b) Effet des pertes de flux

Le calcul exécuté en utilisant la formule précédente est inexact; en réalité, le circuit magnétique est plongé dans l'air. Il existe un flux de fuite qui augmente la valeur de B et donc diminue celle de μ.

B varie en tout point du circuit magnétique en raison des pertes de flux.

La formule où B et μ sont variables en chaque point de chaque tronçon dl est évidemment d'application malaisée. On peut toutefois contourner la difficulté par un calcul suffisamment approché.

c) Exemple d'application

Considérons l'électro-aimant de la figure 10.

Les flèches 1 représentent des lignes de force utiles qui passent par l'entrefer et contribuent à l'attraction du noyau. Les flèches 2 et 3 représentent des lignes de force inutiles, qui ne provoquent aucune attraction du noyau et sont donc nuisibles car elles réduisent la valeur de μ dans le noyau.

Ces lignes de force 2 et 3 constituent les "pertes magnétiques".

Le flux de fuite passe par l'entrefer compris entre le circuit magnétique et le noyau et évidemment par une partie du noyau et du circuit magnétique comme le montrent les flèches, il contribue donc à saturer le circuit magnétique, c'est-à-dire à réduire la valeur de μ, il est donc non seulement inutile mais nuisible.

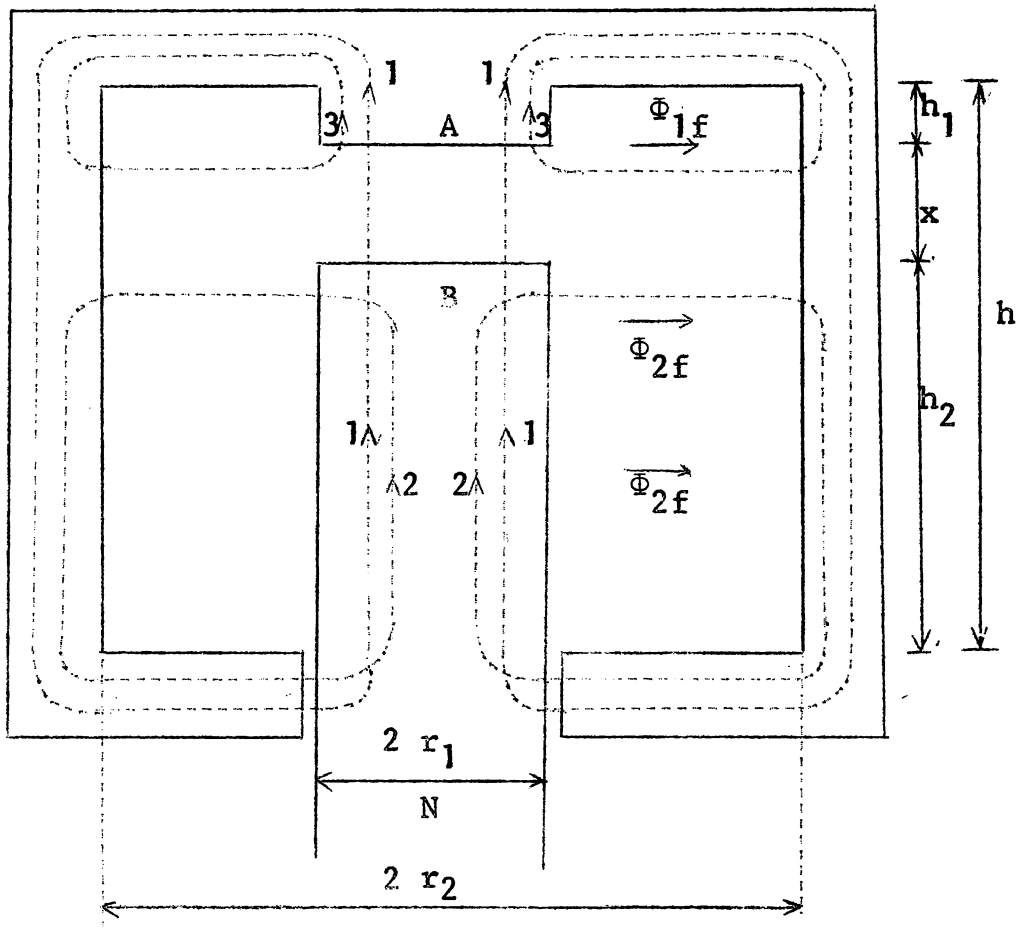


FIGURE 10

Dans un calcul d'électro-aimant, il faut vérifier si la saturation n'est pas atteinte en raison des pertes magnétiques.

CALCUL DES FLUX DE FUITE Φ_{1f}, Φ_{2f}:

Le flux de fuite Φ_{1f} est la résultante de l'ensemble des flux de fuite élémentaires $d\Phi_{1f}$, de même le flux de fuite Φ_{2f} est également la résultante de l'ensemble des flux de fuite élémentaires $d\Phi_{2f}$ (figure 11).

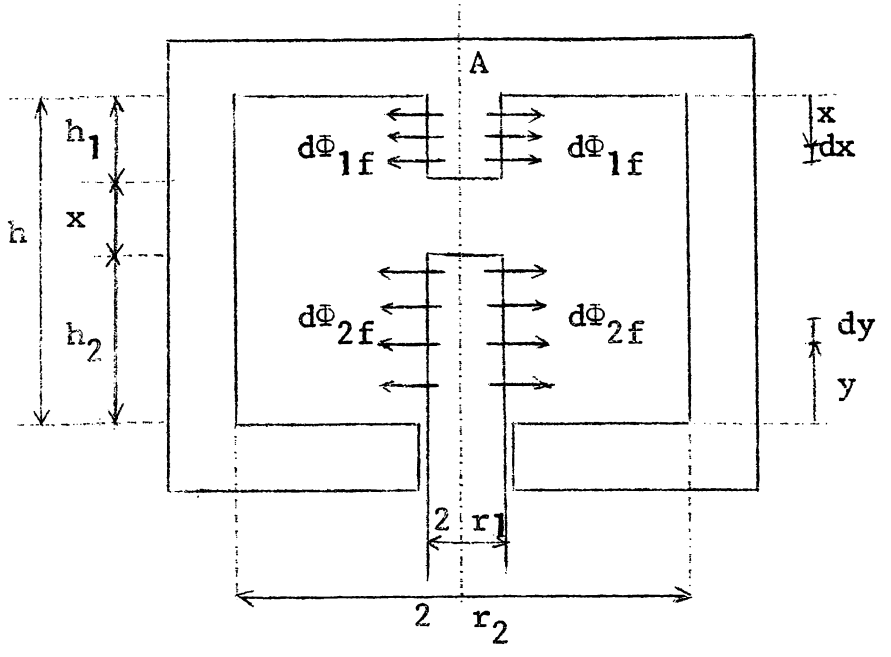


FIGURE 11

Un flux élémentaire $d\Phi_{1f}$ vaut le produit de la force magnétomotrice par la perméance correspondante.

La force magnétomotrice à la cote x vaut : $\frac{\mathcal{F}}{h} x$; en effet, les spires sont réparties uniformément sur la hauteur h. Et si l'on suppose que la seule réluctance due à l'air doive être considérée, la réluctance sur la cote dx vaut celle qui existe entre les deux cylindres coaxiaux de hauteur dx et de rayon r_1 et r_2.

$$d\Phi_{1f} = \frac{\mathcal{F}}{h} x \cdot \frac{2 \pi \, dx}{2{,}3 \, \mathrm{Log} \frac{r_2}{r_1}} \cdot \mu_o$$

Le flux Φ_{1f} de fuite vaut :

$$\Phi_{1f} = \mu_o \int_o^{h_1} \frac{\mathcal{F} x}{h} \cdot \frac{2 \pi \, dx}{2{,}3 \, \mathrm{Log} \frac{r_2}{r_1}} = \mu_o \frac{\mathcal{F}}{h} \cdot \frac{2 \pi}{2{,}3 \mathrm{Log} \frac{r_2}{r_1}} \cdot \int_o^{h_1} x \, dx$$

$$\Phi_{1f} = \frac{\mu_o \pi h_1^2 \mathcal{F}}{h . 2{,}3 \mathrm{Log} \frac{r_2}{r_1}}$$

Or $\frac{\mathcal{F} h_1}{h}$ représente la force magnétomotrice sur toute la hauteur h_1 et

$\frac{\mu_o \pi h_1}{2{,}3 \operatorname{Log} \frac{r_2}{r_1}}$ représente la demi perméance entre les deux cylindres constitués par le noyau et la surface interne de l'armature.

D'où : $\Phi_{1f} = \frac{\mu_o 1}{2} \frac{\mathcal{F} h_1}{h} P_{1f}$

Le flux de fuite Φ_{1f} vaut donc la moitié du flux qui serait produit par la force magnétomotrice $\mathcal{F}.h_1/h$ et la demi-perméance entre les deux cylindres.

On pourrait démontrer de même que :

$$\Phi_{2f} = \mu_o \frac{\mathcal{F} h_2}{h} \cdot \frac{\pi h_2}{2{,}3 \operatorname{Log} \frac{r_2}{r_1}}$$

il suffit de considérer comme force magnétomotrice à un niveau quelconque le produit :

$$\frac{\mathcal{F}}{h} \cdot y$$

D'où : $\Phi_{2f} = \frac{\mu_o 1}{2} \frac{\mathcal{F} h_2}{h} P_{2f}$

On appelle P_{1f}, P_{2f} les perméances des deux cylindres de hauteur h_1 et h_2.

Le flux utile engendré vaut Φ, il passe respectivement en A et B (figure 11). Les flux Φ_A et Φ_B valent :

$$\Phi_A = \Phi + \Phi_{1f} = V_A \Phi$$

$$\Phi_B = \Phi + \Phi_{2f} = V_B \Phi$$

Or $\Phi = \mathcal{F}.P_e$ et de $V_A \Phi = \Phi + \Phi_{1f}$

on tire : $V_A = 1 + \frac{\Phi_{1f}}{\Phi} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\mathcal{F} h_1 P_{1f}}{h \mathcal{F} P_e}$

d'où :

$$V_A = 1 + \frac{1}{2} \frac{h_1 P_{1f}}{h P_e}$$

De même :

$$V_B = 1 + \frac{\Phi_{2f}}{\Phi} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\mathcal{F} h_2 P_{2f}}{h \mathcal{F} P_e}$$

$$V_B = 1 + \frac{1}{2} \frac{h_2 P_{2f}}{h P_e}$$

On doit vérifier que Φ_A et Φ_B divisés respectivement par la section du noyau ne donneraient pas une induction exagérée ce qui ferait décroître μ et donc entraînerait une augmentation excessive des ampères-tours efficaces. Si les inductions sont excessives il faut accroître la section du noyau.

La force magnétomotrice totale à prévoir est alors la résultante de deux parties :

a) la force magnétomotrice utile celle qui fait circuler le flux dans l'entrefer

b) la force magnétomotrice nécessaire pour faire circuler le flux dans le circuit magnétique complet.

On se donne le circuit magnétique, on en déduit l'induction grâce au calcul des flux totaux, on détermine les ampères-tours/mètre qui en résultent et on fait ainsi le calcul des ampères-tours nécessaires pour chaque tronçon du circuit magnétique. La somme des ampères-tours partiels donne les ampères-tours à prévoir.

REMARQUES :

1. La présence du noyau fixe (hauteur h_1) canalise le flux et donc réduit les fuites magnétiques.

2. On réduit encore ces dernières en choisissant un diamètre extérieur beaucoup plus grand que celui du noyau : r_2 vaut par exemple 2 r_1 ou mieux 3 r_1 , il en résulte une réduction de P_{1f} et P_{2f}.

3. L'allongement excessif du noyau augmente les pertes magnétiques (accroissement de P_{1f} , P_{2f}).

3. DETERMINATION DE L'ENROULEMENT :

Soit N I la somme des ampères-tours à prévoir pour obtenir le flux utile et les flux de fuite. On voit de suite que seul le produit N I est déterminé ce qui permet à chacun des facteurs de varier à condition que leur produit soit constant.

En pratique, l'on dispose d'une tension d'alimentation U, d'un circuit magnétique, ce qui permet de faire une hypothèse (à vérifier) sur la longueur moyenne de la spire soit l.

Fixons nous une densité de courant J et choisissons comme inconnue la section du fil : s

L'on a immédiatement : s J = I

$$\frac{N\ l\ \rho}{s}\ I = U$$

en appelant ρ la résistance du cuivre à chaud par m de longueur et par mm^2 de section.

Dans la seconde relation, qui peut s'écrire :

$$s = \frac{\rho\ N\ I\ l}{U}$$

tout est connu sauf s. On obtient donc la section du fil.

Il faut déterminer I, qui vaut J s puis déduire N grâce à la détermination de N I qui a déjà été faite au début des calculs.

On doit vérifier si le bobinage composé de N spires peut être placé sur l'électro-aimant et si la longueur moyenne correspond effectivement à celle qui a été calculée.

S'il n'y a pas de correspondance entre la valeur supposée et la valeur trouvée, on recommencera les calculs avec une autre hypothèse sur la valeur de l. En pratique l'on recommence sur la base de la valeur trouvée pour l.

Pour vérifier si le bobinage peut être exécuté, on pourra se rapporter aux données du tableau ci-dessous qui donne le facteur de remplissage dans le cas d'un fil rond en fonction du diamètre et du type d'isolation.

Il est prévu un papier mince entre deux couches successives de l'enroulement.

Le facteur de remplissage f_r est donné par le rapport entre la section totale de cuivre N.s et la section totale de la bobine (cuivre, isolant, interstice) mesuréepar le produit h.e (hauteur et épaisseur de l'enroulement).

FACTEUR DE REMPLISSAGE POUR FIL ROND

Diamètre du fil nu en mm	Valeur du facteur de remplissage en %				
	Fil isolé à émail	Fil recouvert d'une couche de soie	Fil recouvert d'une couche de coton ou de 2 couches de soie	Fil émaillé recouvert d'une couche de soie	Fil recouvert de 2 couches de coton
0,09	60	–	–	–	–
0,3	70	55	40	50	25
0,9	73	70	60	65	50
3	75	–	70	–	65

THEOREMES RELATIFS A L'ENROULEMENT

THEOREME N°1

Lorsqu'un enroulement est constitué de N spires de section s alimenté à une tension U et que la force magnétomotrice est insuffisante, il est vain d'ajouter des spires pour accroître la force magnétomotrice.

Supposons que la spire moyenne de l'enroulement ait une résistance de r ohms.

Le courant qui circule dans l'enroulement vaut : $\frac{U}{N\,r}$

La force magnétomotrice vaut : $\frac{N\,U}{N\,r} = \frac{U}{r}$

La force magnétomotrice est indépendante de N

Remarque: En fait ajouter des spires au-dessus d'un bobinage préexistant revient à accroître la résistance moyenne des spires et donc à réduire N I.

THEOREME N°2

Lorsqu'un enroulement est constitué de N spires de section s et que la force magnétomotrice engendrée est insuffisante, il faut majorer la tension d'alimentation pour produire la force magnétomotrice suffisante.

D'après le théorème précédent, la force magnétomotrice vaut: $\frac{U}{r}$ en appelant r la résistance moyenne des spires

L'on peut donc accroître la force magnétomotrice en agissant sur U.

Remarque: Il faut évidemment que sous la nouvelle tension appliquée, l'échauffement de l'enroulement reste satisfaisant.

THEOREME N°3

La puissance absorbée par un électro- aimant alimenté en courant continu peut être réduite à une valeur très faible.

Considérons un enroulement composé de N spires dont la résistance moyenne vaut r ohms.

Le courant absorbé vaut : $\frac{U}{N\ r}$

La puissance absorbée vaut : $\frac{U^2}{N\ r}$

Augmenter le nombre de spires de N' à N revient à absorber une puissance :

$$\frac{U^2}{N'r}$$

Toutefois en vertu de la remarque du théorème n°1, il en résulte une réduction de la force magnétomotrice.

PROBLEME N°1

Considérons un enroulement d'électro-aimant de longueur L constitué de N spires, que se passe-t-il si l'on ajoute aux N spires déjà existantes un nouvel enroulement de longueur L' de même composition composé de N' spires?

La résistance moyenne d'une spire vaut r dans les deux cas.

La puissance absorbée initiale vaut : $\frac{U^2}{N\ r}$

La puissance absorbée finale vaut :

$$\frac{U^2}{N\ r + N'\ r} = \frac{U^2}{r\ (N + N')}$$

Le nombre initial d'ampères-tours vaut:

$$\frac{N\ U}{N\ r} = \frac{U}{r}$$

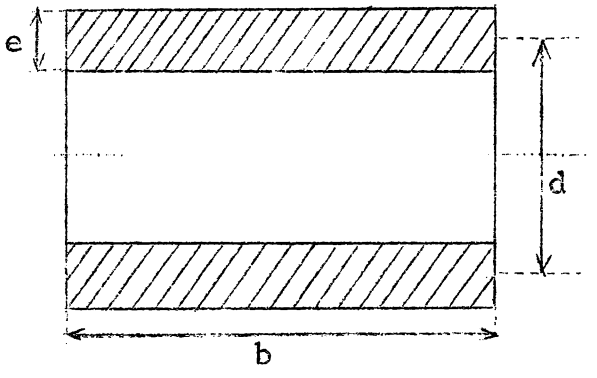
Le nombre final d'ampères-tours vaut :

$$\frac{(N + N')\ U}{(N + N')\ r} = \frac{U}{r}$$

En principe l'on a donc une force magnétomotrice identique et une réduction de la puissance absorbée. En fait, le second électro-aimant sera moins énergique que le premier en raison de l'accroissement des fuites magnétiques.

PROBLEME N°2

Etant donné un volume disponible, calculer la section et le nombre de spires d'un enroulement capable d'engendrer un nombre donné d'ampères-tours alimenté à la tension U



La section brute du bobinage vaut : b . e

La section nette de cuivre vaut : b . e . f_r où f_r représente le coefficient de bobinage.

Appelons l la longueur moyenne d'une spire : π . d

La résistance totale R vaut : $\rho \frac{N\ l}{s}$

La tension U vaut R I soit : $\rho \frac{N\ l}{s} I = \rho \frac{l}{s} N\ I$

On en déduit s et le nombre de spires N :

$$N = \frac{f_r . b . e}{s}$$; on calcule ensuite R puis I.

Il faut vérifier si le courant I n'est pas excessif afin d'éviter un échauffement exagéré.

PROBLEME N°3

Etant donné un volume disponible, calculer la section d'un enroulement dont la résistance doit valoir R ohms.

$$R = \rho \frac{N\ l}{s} \quad \text{et} \quad s = \frac{b.e.f_r}{N}$$

d'où : $$R = \rho \frac{l}{s} . \frac{b.e.f_r}{s} \quad \text{et} \quad s = \sqrt{\rho \frac{l.b.e.f_r}{R}} \quad (x)$$

4. VERIFICATION DE L'ECHAUFFEMENT :

La puissance électrique consommée $R\ I^2$ est dissipée par les calories. L'échauffement de l'enroulement est mesuré par la formule :

$$P = \alpha\ S\ \Delta\theta$$

où $\Delta\theta$ représente l'échauffement par rapport à l'ambiance.

En pratique l'échauffement sera faible si la surface latérale de l'enroulement exprimé en cm^2 vaut 20 P soit $20\ R\ I^2$. Ce coefficient est valable en régime continu.

En régime intermittent, l'on peut prendre une surface moindre qui peut descendre jusqu'à $6\ R\ I^2$.

On peut calculer plus exactement l'échauffement en utilisant la formule :

$$P = \alpha . S . \Delta\theta$$

où P représente les pertes en watts, S la surface latérale en dm^2 et α un coefficient qui tient compte de l'échauffement et de la nature du contact enroulement-carcasse.

On utilise le coefficient α_1 s'il existe un jeu entre l'enroulement et la carcasse.

(x) Comme f_r est fonction de s, cette équation doit être résolue par tâtonnement.

On utilise le coefficient α_2 si l'enroulement est en contact intime avec la carcasse qui alors conduit mieux la chaleur.

$\Delta\theta$	20°	50°	80°
α_1	0,105	0,1125	0,120
α_2	0,115	0,125	0,135

Pour les électro-aimants qui doivent rester longtemps en service, on prévoit un contact d'économie introduisant une résistance électrique en série avec l'enroulement quand l'armature est attirée.

Cette résistance s'appelle résistance d'économie R_e. On place une résistance de décharge R_d pour réduire l'étincelle de rupture aux contacts.

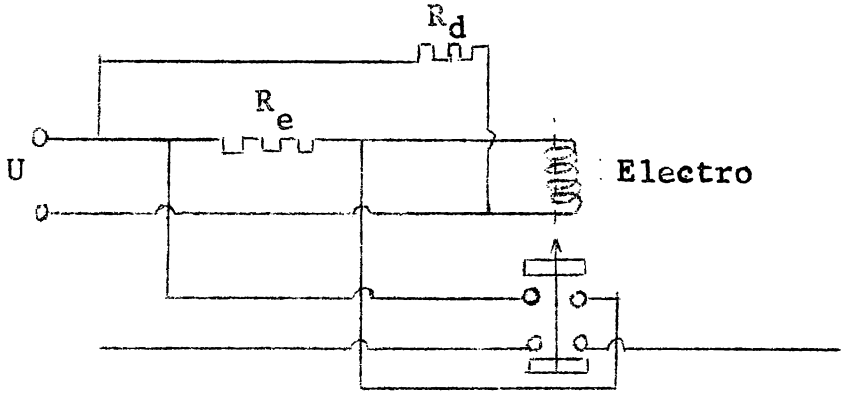


FIGURE 12

Les contacts inférieurs (figure 12) sont les contacts principaux, les contacts supérieurs sont les contacts auxiliaires.

Soit R la résistance de l'électro proprement dit. Quand l'électro est enclenché, la résistance R_e est en service:

R_e vaut de R à 2 R

La résistance de décharge vaut : R_d = 2 R à 4 R

5. DONNEES PRATIQUES :

L'induction dans le noyau : comprise entre 0,8 et 1 wéber par m^2 si le service est continu, entre 1 et 1,5 wéber par m^2 si le service est intermittent.

L'induction dans le relais est comprise entre 0,3 et 0,5 Wéber par m^2.

Dans les autres parties du circuit magnétique, les inductions sont plus faibles car ce sont généralement des conditions mécaniques qui imposent la section.

La carcasse peut être en fonte (coût moindre, si la fabrication se fait en grande série) ou en acier coulé, ou en tôle.

La forme du plongeur dépend de la course du noyau. La surface sera plane si la course est inférieure à 20 mm. Pour des courses de 20 à 40 mm, l'on prendra un angle de 45°. Pour des courses plus longues, l'on choisira les angles de 20 ... 10°.

La densité du courant varie de 2,5 à 5 A/mm^2 suivant le service. L'échauffement, différence de température au-dessus de l'ambiance, varie de 60° dans le cas d'un fil isolé à l'émail à 80° pour un fil isolé à la soie de verre.

La carcasse de la bobine sera en laiton ou en cuivre rouge. La carcasse est prolongée par des joues épaisses de 3 à 5 mm. Dans un relais la carcasse en cuivre temporise le fonctionnement de l'électro.

Le diamètre du noyau est fixé par l'induction maximum soit D, ce diamètre.

La hauteur de la bobine vaut : 2 à 4 D

Le diamètre du bobinage vaut : 2 à 3 D

Emplacement de l'entrefer sur la hauteur h : dans le cas d'un noyau à face plane : 0,25 à 0,5 h ; dans le cas d'un noyau en cône tronqué, la base du cône vient au même endroit.

Jeu entre carcasse de bobine et noyau : 1 à 1,5 mm. Jeu entre noyau et plateau inférieur : 0,5 mm sur le diamètre. L'entrefer au collage sera de 0,3 à 0,5 mm dans le cas d'un noyau à face plane et de 0,5 à 1 mm mesuré perpendiculairement à la surface dans le cas d'un noyau à face conique.

Espace disponible pour la ventilation entre bobine et carcasse : 10 à 20 mm.

Souvent l'appareil est muni d'un dashpot en fin de course.

6. EXEMPLE DE CALCUL D'UN ELECTRO-AIMANT :

On demande de calculer un électro-aimant développant 10 kg d'effort utile, une course de 4 cm et qu'il puisse fonctionner pour une tension égale à 90% de la tension nominale et soit en outre capable de supporter 110% de la tension nominale.

On suppose, quitte à vérifier cette hypothèse, que le diamètre du noyau est de 7 cm.

Les données pratiques précédentes donnent les dimensions suivantes, sujettes à vérification ultérieure :

Hauteur de la bobine : 4 D = 28 cm ; on a choisi la plus grande hauteur possible pour la bobine car la course est longue.

Hauteur totale de la bobine avec joues : 32 cm

Diamètre extérieur du bobinage : 2 D = 14 cm

Diamètre extérieur de la carcasse : 2,5 D = 18 cm

Emplacement de l'entrefer : $h_1 = 0,3\ h = 0,3.32 \simeq 10$ cm

La course est longue, on fera choix d'un électro-aimant dont le noyau plongeur sera terminé par un cône tronqué. Prenons : $\alpha = 15°$.

Supposons que le noyau est, par exemple, de 25 cm.

La surface vaut : $\pi.7^2/4 = 38,5\ cm^2$

Poids du noyau : 0,385. 2,5. 7,8 = 7,5 kg

Arrondissons à 18 kg l'effort réel à produire.

La formule de l'effort en fonction de la course est :

$$F = \frac{6,4 \cdot 10^{-8}\ (N\ I)_e^2\ \pi\ a\ d_{moyen}}{x^2 \quad \sin\alpha\ \cos\alpha}$$

Prenons $\alpha = 15°$ $\quad \sin\alpha = 0,26 \quad \cos\alpha = 0,965$

$\operatorname{tg}\alpha = 0,27$

Prenons a = 1,25 course = 1,25 × 4 = 5 cm

$$\frac{D - d}{2} = a \operatorname{tg} \alpha \qquad d = D - 2\, a \operatorname{tg} \alpha = 4{,}3 \text{ cm}$$

La course est de 4 cm.

Supposons qu'à fond de course, il reste un jeu de 1 mm mesuré perpendiculairement à la surface latérale du tronc de cône :

$$x = 4 + \frac{0{,}1}{0{,}25} = 4{,}4 \text{ cm}$$

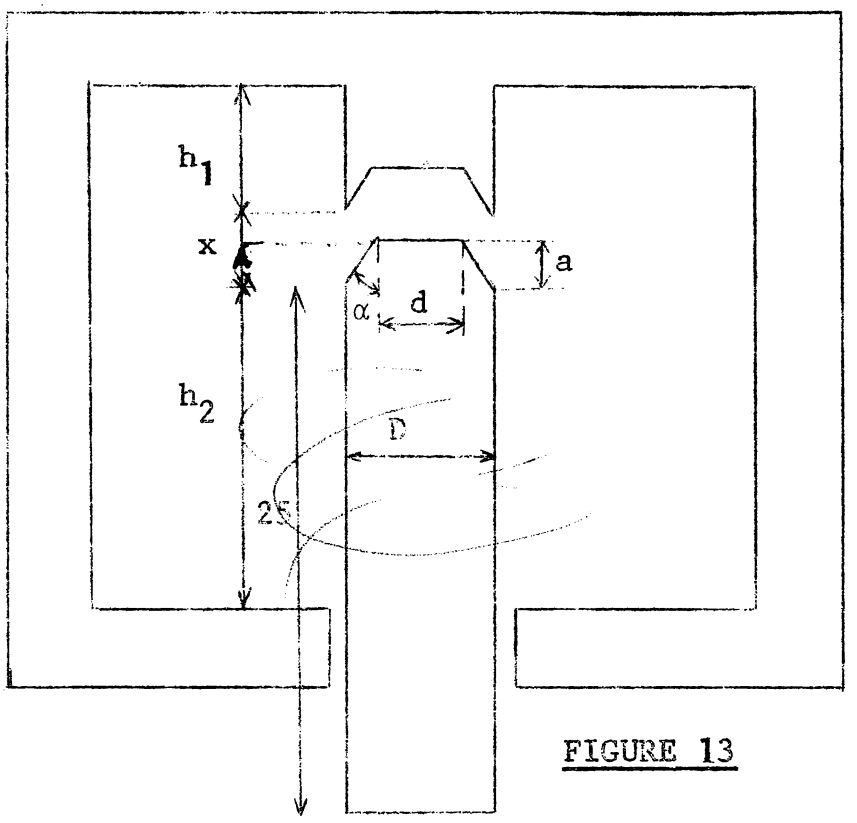


FIGURE 13

$$F = \frac{6{,}4 \cdot 10^{-8} \, (N\,I)_e^2 \, \pi \, a \, d_{moyen}}{x^2 \, \sin \alpha \, \cos \alpha} = 18$$

$$(N\,I)_e = \sqrt{\frac{18 \cdot 4{,}4^2 \cdot 0{,}26 \cdot 0{,}965 \cdot 10^8}{6{,}4 \cdot \pi \cdot a \cdot 5{,}65}} = 4.050$$

Arrondissons à 4.100 A.T.

Calculons ensuite le flux utile Φ en déterminant la perméance dans l'entrefer.

$$P_e = \left(\frac{\pi \, d_{moyen} \, a}{x \sin \alpha \cos \alpha} - \frac{\pi \, d_{moyen} \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{\mu_o}{100}$$

$$P_e = \left(\frac{\pi \cdot 5,65 \cdot 5}{4,4.0,26.0,965} - \frac{\pi \cdot 5,65 \cdot 0,965}{0,26} \right) \frac{1}{100} \cdot \mu_o$$

$$P_e = 0,155 \, \mu_o$$

Le dénominateur 100 est du au fait qu'il faut mesurer les longueurs en mètres.

La perméance d'entrefer P_e vaut $0,155 \, \mu_o =$

$$0,155 . 4 \pi . 10^{-7} = 1,95 . 10^{-7}$$

Le flux utile Φ vaut $N I P_e = 4100.1,95.10^{-7} = 8.10^{-4}$ Wéber

Calculons les perméances P_{1f} , P_{2f}.

$$P_{1f} = \frac{2 \pi h_1}{2,3 \operatorname{Log} \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{100} \cdot \mu_o = \frac{2 \pi 10}{2,3 \operatorname{Log} \frac{8}{3,5}} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{4 \pi}{10^7} = 9,6.10^{-7}$$

$$P_{2f} = \frac{2 \pi h_2}{2,3 \operatorname{Log} \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{100} \cdot \mu_o = \frac{2 \pi 22}{2,3 \operatorname{Log} \frac{8}{3,5}} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{4 \pi}{10^7} = 21.10^{-7}$$

Les coefficients V_A, V_B valent respectivement :

$$V_A = 1 + \frac{1}{2} \frac{h_1}{h} \frac{P_{1f}}{P_e} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{10}{32} \cdot \frac{9,6.10^{-7}}{1,95.10^{-7}} = 1,76$$

$$V_B = 1 + \frac{1}{2} \frac{h_2}{h} \frac{P_{2f}}{P_e} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{22}{32} \cdot \frac{21 . 10^{-7}}{1,95.10^{-7}} = 4,69$$

$$\Phi_A = V_A \, \Phi = 1,76 . 8 . 10^{-4} = 14,1 . 10^{-4} \text{ Wéber}$$

$$\Phi_B = V_B \, \Phi = 4,69 . 8 . 10^{-4} = 37,4 . 10^{-4} \text{ Wéber}$$

$$B_A = \frac{14,1 \cdot 10^{-4}}{38,5 \cdot 10^{-4}} = 0,367 \text{ Wéber par } m^2$$

$$B_B = \frac{37,4 \cdot 10^{-4}}{38,5 \cdot 10^{-4}} = 0,975 \text{ Wéber par } m^2$$

Ces valeurs sont satisfaisantes, la saturation n'est pas atteinte.

AVANT PROJET DE BOBINAGE

Aux ampères-tours d'entrefer, il faut ajouter les ampères-tours nécessaires à la circulation du flux dans le circuit magnétique ; soit provisoirement 20% des ampères-tours utiles soit en tout :

$$1,2 \cdot 4100 = 4920 \text{ AT}$$

Les ampères tours nécessaires doivent être créés lorsque la tension est réduite à 90 % de la valeur nominale et lorsque l'enroulement est chaud (115°C). A froid, l'enroulement créera donc beaucoup plus d'ampères tours; il créera :

$$\frac{4920 \cdot 1,4}{0,9} = 7650 \text{ AT à froid et pour la pleine tension.}$$

Le coefficient 1,4 mesure l'accroissement de résistance à chaud.

La longueur moyenne d'une spire vaut : $\pi \frac{14 + 8,6}{2}$ cm en supposant par un tracé préalable que la bobine soit haute de 28 cm et que son diamètre extérieur soit de 14 cm et son diamètre intérieur de 8,6 cm.

Longueur moyenne : 35,5 cm = 0,355 m

La section du fil de cuivre s vaut : $s = \rho \frac{1 N I}{U}$

$$s = \frac{17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,355 \cdot 7650}{220} = 21 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$$

Il est commode d'adopter pour ρ 17.10^{-3} Pour un fil de 1m et 1 mm^2

Le diamètre du fil correspondant : 0,515 mm

Le nombre de spires peut être déduit des considérations suivantes :

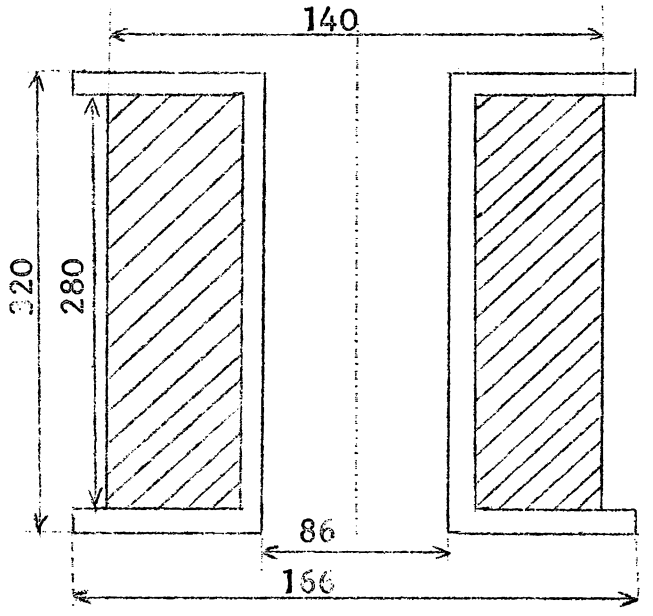


FIGURE 14

Section de la bobine en mm^2 = 280 . $\frac{140 - 86}{2}$ = 7550 mm^2

Imposons-nous une densité de 3 A/mm^2, le courant vaudra :

$$21 \cdot 10^{-2} \cdot 3 = 0,63 \text{ A}$$

La résistance vaudra : $\frac{220}{0,63}$ = 350 ohms

Le nombre de spires se déduira de cette valeur.

$$R = \frac{N \rho l}{s} \quad \text{d'où} \quad 350 = \frac{N \cdot 17.10^{-3} \cdot 0,355}{21 \cdot 10^{-2}}$$

et N = 12200

Essayons de loger ces spires dans l'emplacement disponible. Un fil de 0,55 mm de diamètre de cuivre occupe avec son isolant 0,75 mm et il faut prévoir que chaque spire occupe en fait 0,8 mm.

Nombre de spires par couche : $\frac{280}{0,8}$ = 350

Nombre de couches superposées : $\frac{140 - 86}{2} : 0,8 = 33$

Nombre total de spires : 33 . 350 = 11.500 spires

Ce nombre de spires est inférieur à celui prévu. Il faut donc allonger un peu la bobine. On peut réduire le jeu entre joues et bobine à 5 mm et l'épaisseur de chaque joue à 5 mm.

La longueur disponible devient alors : 320 - 15 = 305 mm

Le nombre de spires devient alors : $\frac{11.500 \times 305}{280} = 12500$ ce qui est très proche de la valeur prévue.

Ce résultat est satisfaisant. Vérifions l'échauffement.

La puissance à chaud sous la tension maximum vaut :

$$\frac{(1,1 \ . \ 220)^2}{1,4 \ . \ 350} = 120 \text{ Watts}$$

La surface latérale de l'enroulement vaut : $\pi.14.28 = 1230 \text{ cm}^2$

Le coefficient α pour un $\Delta\theta$ de 80° vaut 0,12

$$S = 12,3 \text{ dm}^2$$

Les pertes pour $\Delta\theta$ = 80° admissibles valent :

$$0,12 \ . \ 12,3 \ . \ 80 = 118 \text{ Watts}$$

L'effet Joule vaut 120 Watts.

L'échauffement est donc voisin de 80°.

DEUXIEME APPROXIMATION

On part des ampères-tours nécessaires pour créer le flux utile soit 4100 AT.

L'on détermine ensuite les ampères-tours totaux.

Parties	Flux en Wébers	Surface en m^2	Induction Wébers/m^2	AT/m	Longueur m	AT totaux
Noyau fixe	$1,41.10^{-3}$	$38,5.10^{-4}$	0,367	200	0,1	20
Noyau mobile	$3,74.10^{-3}$	$38,5.10^{-4}$	0,975	500	0,22	110
Carcasse	$1,41.10^{-3}$	$54 .10^{-4}$	0,262	700	0,1	70
	ou $3,74.10^{-3}$	$54 .10^{-4}$	0,69	3600	0,22	792
Entrefer seul	$0,8 .10^{-3}$					4100
TOTAL						5092

N.B. L'entrefer entre joints a été négligé ainsi que la réluctance des plateaux.

Remarques :

1) La section de la carcasse vaut : $\frac{\pi}{4} (18^2 - 16^2) = 54 \text{ cm}^2$

2) Le noyau est en acier coulé et la carcasse en fonte

Le total des A.T. correspond aux conditions les plus dures (0,9 U et 115°).

Sous la tension nominale et à froid, il faut obtenir :

$$\frac{5092 \cdot 1,4}{0,9} = 8000 \text{ A.T.}$$

Le bobinage prévu 12500 spires donnera 8200 A.T., il est donc suffisant.

Remarque :

Il y a lieu de noter que les conditions imposées simultanément ne sont pas incompatibles.

En effet, l'électro-aimant pourrait être alimenté à la tension 1,1 U, ce qui provoquerait l'échauffement maximum, puis la tension pourrait être coupée un instant et l'appareil pourrait être alimenté sous tension réduite 0,9 U et dans ces conditions il devrait encore fonctionner.

AUTRE EXEMPLE DE CALCUL

Déterminer les éléments fondamentaux d'un électro-aimant en fer à cheval (figure 15).

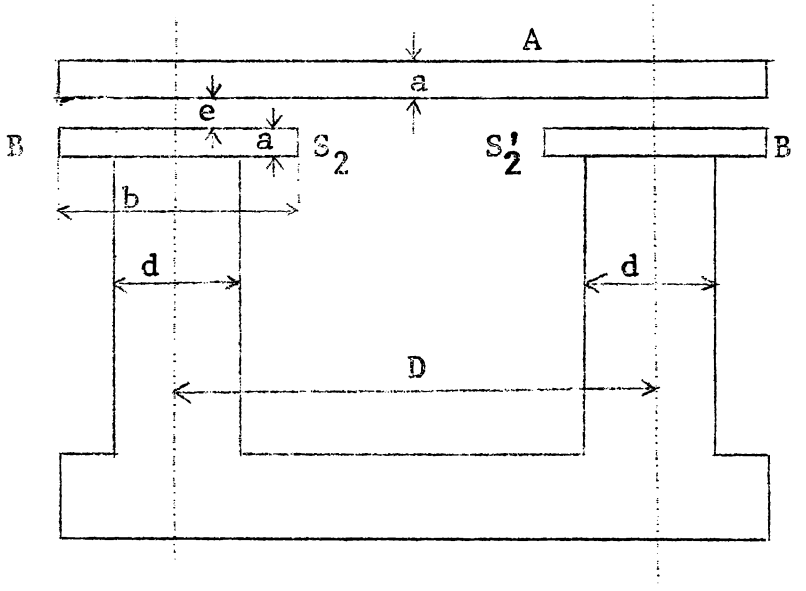


FIGURE 15

La difficulté provient de la longueur de l'entrefer à considérer. Faut-il prendre x = 2 e ? Que faut-il adopter pour S ?

Pour lever ces difficultés, revenons à la théorie exposée à l'alinéa 2 qui est valable dans tous les cas :

$$F\,dx = -\frac{I^2}{2}\,dL$$

$$F = -\frac{I^2}{2}\,\frac{dL}{dx}$$

Dans le cas présent dx = de P : perméance

$$L = \frac{N\,\Phi}{I} = \frac{N}{I}\,N\,I\,P = N^2\,P$$

d'où :

$$\frac{dL}{dx} = \frac{dL}{de} = N^2\,\frac{dP}{de}$$

Que vaut P?

$$P = \mu_o \frac{S}{2\,e}$$ en négligeant la reluctance dans l'air

d'où $$\frac{dL}{dx} = N^2\,\mu_o\,\frac{d\,\frac{S}{2e}}{de} = \frac{N^2\,\mu_o\,S}{2\,e^2}$$

et $$F = -\frac{I^2}{2} \cdot \frac{N^2\,\mu_o\,S}{2\,e^2} = -\frac{4\pi\,10^{-7}(NI)^2\,S}{4\,e^2}$$

La formule générale est d'application :

$$F\,dx = -\frac{I^2}{2}\,dL$$

Dans le cas présent dx vaut 2 de.

D'où :

$$F = -\frac{I^2}{4}\,\frac{dL}{de}$$

En suivant le même raisonnement qu'au paragraphe 2, il vient :

$$\Phi = N\,I\,P \qquad L = \frac{N\,\Phi}{I} = N^2\,P$$

Or, $$P = \mu_o\,\frac{2\,S}{2\,e} = \mu_o\,\frac{S}{e}$$

D'où :

$$L = \frac{\mu_o\,N^2\,S}{e}$$

et :

$$F = -\mu_o\,\frac{(NI)^2}{4}\,\frac{d\,\frac{S}{e}}{de}$$

$$F = -\frac{4\,\pi\,10^{-7}(NI)^2}{4} \cdot \frac{d\,\frac{S}{e}}{de}$$

F en valeur absolue en kg vaut :

$$\pi\ 10^{-7}.\ 0{,}102\ (NI)^2\ \frac{d\frac{S}{e}}{de}$$

ou : $3{,}2.10^{-8}(NI)^2\ \frac{d\frac{S}{e}}{de}$

S vaut dans le cas présent b^2

F en kg vaut : $\frac{-\pi\ .\ 0{,}102\ .\ 10^{-7}\ (NI)^2\ b^2}{e^2}$

Fen valeur absolue = $\frac{3{,}2.10^{-8}(NI)_e^2\ b^2}{e^2}$

Dans cette formule les seuls ampères tours à considérer sont ceux qui servent à faire circuler le flux dans l'entrefer c'est pourquoi l'indice e affecte (NI).

EXEMPLE D'APPLICATION

L'armature doit être sollicitée avec une force de 12,8 kg.
L'entrefer e vaut 50 mm
Le côté b mesure 50 mm
Calculez le nombre d'ampères tours à prévoir :

$$(NI)_e^2 = \frac{12{,}8\ .\ (0{,}05)^2}{3{,}2.10^{-8}.(0{,}05)^2} = 4\ .\ 10^8$$

$$NI = 20.000$$

L'induction B_e vaut :

$$F = 4,07 \cdot 10^4 \cdot B_e^2 \cdot 2\,S$$

On doit ici considérer 2 fois la section car chaque noyau attire l'armature :

$$B_e^2 = \frac{12,8 \cdot 10^{-4}}{4,07 \cdot 2\,S} = \frac{12,8 \cdot 10^{-4}}{8,14 \cdot (0,05)^2}$$

$$B_e = 0,25 \text{ Wéber/m}^2$$

Cette valeur est très faible. L'appareil est donc capable d'exercer un effort beaucoup plus grand.

Calculons l'enroulement.

Bases : Tension 200 volts
d = 25 mm
h = 250 mm

L'enroulement sera réparti en deux bobines placées sur chaque colonne qui sera donc soumise à la demi tension.

Admettons un diamètre moyen de bobine de 60 mm :

$$\frac{U}{2} = \rho \frac{1}{s} I = \rho \frac{N\,I\,\pi \cdot 0,060}{s} = 100$$

$$s = \rho \frac{10000 \cdot \pi\ 0,060}{100}$$

A chaud ρ vaut 0,025

$$s = \frac{0,025 \cdot 10000 \cdot \pi \cdot 0,060}{100}$$

$$s = 0,47 \text{ mm}^2$$

Admettons une densité de 2,5 A/mm^2.

Le courant vaudra 1,25 A

Il faudra donc prévoir $\frac{20000}{1,25}$ = 16000 spires

Ces spires seront réparties sur les deux colonnes.

Le fil aura un dia ètre de 0,8 mm

Le fil isolé aura un diamètre de 0,9 mm

On pourra placer sur une seule couche (avec un foisonnement de 10%) :

$$\frac{250}{1,1.0,9} = 250 \text{ spires}$$

Le nombre de couches à prévoir est de :

$$\frac{8000}{250} = 32 \text{ couches}$$

L'épaisseur de l'enroulement est de :

$$32 \cdot 1,1 \cdot 0,9 = 32 \text{ mm}$$

Le diamètre total de l'enroulement est de :

$$25 + 2 \cdot 32 = 89 \text{ mm}$$

Le diamètre de la spire moyenne vaut : 25 + 32 = 57 mm alors que l'on avait supposé un diamètre moyen de 60 mm.

L'appareil sera donc un peu plus fort que prévu.

REMARQUE :

Le calcul qui précède est approché. En effet, il n'a pas été tenu compte des $(AT)_m$ nécessaires à la circulation du flux dans le circuit magnétique.

Pour calculer plus exactement la section de l'enroulement il faudrait se donner une valeur des AT totaux nécessaires, par exemple 1,20 fois les $(AT)_e$ nécessités par l'entrefer.

On calcule ensuite les flux de fuite :

a) entre les 2 noyaux

On appliquera la formule de la page 42 :

$$P_{1f} = \mu_o \frac{\pi \quad H}{2{,}3 \text{ Log } \frac{D}{d/2}}$$

b) entre les faces opposées de 2 plateaux b :

$$P_{2f} = \mu_o \frac{a \quad b}{D-b}$$

On déterminera le flux dans les noyaux et on calculera les $(AT)_m$ nécessaires à la circulation du flux dans le circuit magnétique. On ajoutera ensuite les $(AT)_e$ nécessaires pour la circulation du flux dans l'entrefer. La somme des AT ainsi trouvée doit être égale ou peu inférieure à la valeur supposée plus haut.

Si la différence est trop grande on recommence en partant d'une autre valeur supposée des AT nécessaires à la circulation du flux dans le circuit magnétique.

§ 3 . LES ELECTRO-AIMANTS ALIMENTES EN COURANT ALTERNATIF

1. CALCUL DE LA FORCE D'ATTRACTION :

Les formules qui expriment la force d'attraction en fonction des ampères-tours et de la variation de la perméance sont valables quel que soit le sens du courant car (N I) intervient au carré.

Toutefois, le courant alternatif varie en intensité dans le temps, la force instantanée, proportionnelle au carré du courant variera donc en fonction du temps. Lorsque l'intensité passe par zéro, l'armature n'est plus attirée, à la rémanence près.

L'armature mobile a donc tendance à vibrer lorsque la tension appliquée à l'électro-aimant est alternative.

Il faudra prévoir un dispositif pour supprimer cette tendance. Comparons deux électro-aimants identiques alimentés l'un par une tension continue, l'autre par une tension alternative.

La force d'attraction en courant continu vaut :

$$F = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \, (N\,I)^2 \, \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

a) Cas du courant monophasé

La force d'attraction instantanée en courant monophasé vaut :

$$F_i = 6{,}4 \cdot 10^{-8} (N\,I_m \sin \omega t)^2 \, \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_i = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \, N^2 \, I_m^2 \, \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

La force F est la somme de deux parties F_1 et F_2

$$F_1 = \frac{6{,}4.10^{-8} \, N^2 I_m^2}{2} \, \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_2 = - \frac{6{,}4.10^{-8} \, N^2 I_m^2}{2} \cos 2\omega t \cdot \frac{d\,\frac{S}{x}}{dx}$$

CONCLUSIONS :

1) S'il n'y a pas saturation, la force F_1 est identique pour un courant continu ou pour un courant efficace de même valeur.

2) La force F_2 est sinusoïdale, de même amplitude que F_1 mais à la fréquence double de celle du courant. Dans un cycle complet F_2 s'annulle.

Donc la force F_i s'annulle à certains moments (figure 16):

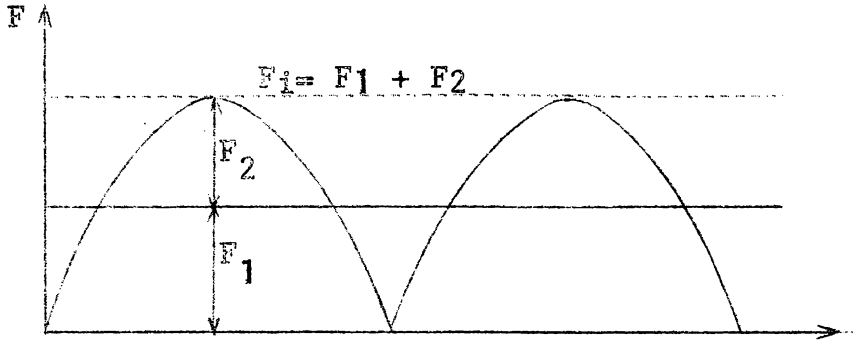


FIGURE 16

La force moyenne vaut donc : $F = 6{,}4.10^{-8}(N\ I_{eff})^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$

Toutefois cette formule suppose que la saturation ne soit pas atteinte.

Si la saturation est atteinte, le flux n'est plus proportionnel aux ampères-tours et la force d'attraction n'est plus proportionnelle au carré du courant.

Si on compare deux électro-aimants identiques fonctionnant au même degré de saturation, dont l'un est alimenté par une source de courant continu et l'autre une source de tension sinusoïdale, l'effort moyen sur l'armature de ce dernier sera égale à la moitié de l'effort développé sur l'armature du premier car il faut considérer pour la saturation la valeur I_m du courant et non la valeur efficace.

b) Cas du courant diphasé

Considérons un électro-aimant sur lequel sont bobinés deux enroulements parcourus par deux courants en quadrature (figures 17 et 18) :

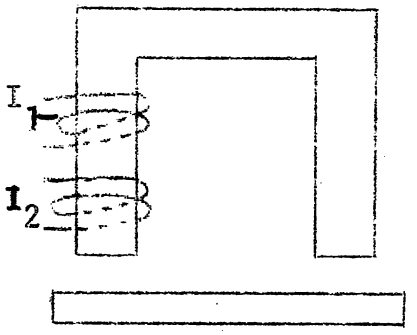


FIGURE 17

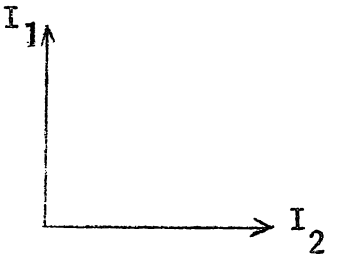


FIGURE 18

L'effort instantané sur l'armature vaut :

$$F_i = 6{,}4.10^{-8} \left(N_1 I_{1m} \sin \omega t + N_2 I_{2m} \cos \omega t\right)^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

Supposons $N_1 = N_2 = N$ et $I_{1m} = I_{2m} = I_m$

$$F_i = 6{,}4.10^{-8} N^2 I_m^2 \left(\sin \omega t + \cos \omega t\right)^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_i = 6{,}4.10^{-8} N^2 I_m^2 \left(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t + 2 \sin \omega t \cos \omega t\right) \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_i = 6{,}4.10^{-8} N^2 I_m^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx} + 6{,}4.10^{-8} N^2 I_m^2 \sin 2\omega t \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

Le second terme a la même amplitude que le premier mais il est alternativement positif et négatif.

L'effort moyen vaut : $6{,}4.10^{-8} N^2 I_m^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$ mais cet effort moyen suit un cycle similaire à celui représenté figure 16.

Si les enroulements sont bobinés sur deux circuits magnétiques séparés (figure 19), les formules se modifient :

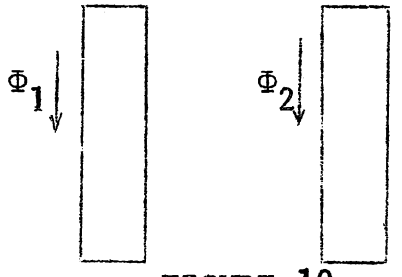


FIGURE 19

L'effort instantané F_i est la somme des deux efforts F_{i1} et F_{i2} :

$$F_{i1} = 6,4 \cdot 10^{-8} (N_1 I_{1m} \sin \omega t)^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_{i2} = 6,4 \cdot 10^{-8} (N_2 I_{2m} \cos \omega t)^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

Supposons $N_1 = N_2 = N$ et $I_{1m} = I_{2m} = I_m$

$$F_i = 6,4 \cdot 10^{-8} N^2 I_m^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

$$F_i = 6,4 \cdot 10^{-8} N^2 I_m^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

L'effort instantané est constant.

Toutefois, remarquons que le point d'attaque passe alternativement du noyau 1 au noyau 2 et réciproquement. On peut par l'artifice représenté à la figure 20 stabiliser le point d'application de la force :

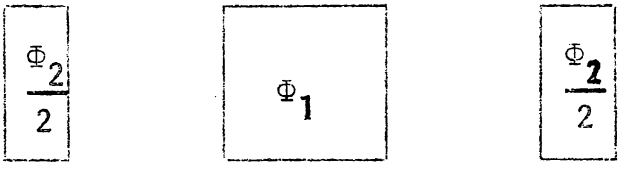


FIGURE 20

La formule $F_i = 6,4 \cdot 10^{-8} N^2 I_m^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$

ne doit pas faire perdre de vue qu'il a fallu deux enroulements au lieu d'un en courant continu, si l'on admet une saturation identique en courant continu et en courant alternatif ($I_m = I$) l'effort sera moitié de celui obtenu en courant continu.

c) Cas du courant triphasé (trois noyaux bobinés:figure 21)

L'effort instantané vaut :

$$F_i = F_{i1} + F_{i2} + F_{i3}$$

$$F_{i1} = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \, (N_1 \, I_{1m} \sin \omega t)^2 \, \frac{d(\frac{S_1}{x_1})}{dx}$$

$$F_{i2} = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \, [N_2 \, I_{2m} \sin(\omega t + 120°)]^2 \, \frac{d(\frac{S_2}{x_2})}{dx}$$

$$F_{i3} = 6{,}4 \cdot 10^{-8} \, [N_3 \, I_{3m} \sin(\omega t + 240°)]^2 \, \frac{d(\frac{S_3}{x_3})}{dx}$$

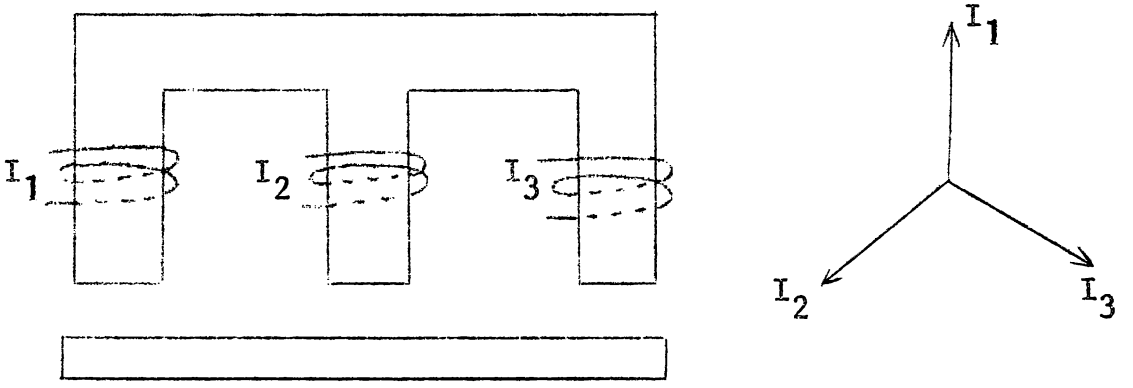


FIGURE 21

Supposons: $I_{1m} = I_{2m} = I_{3m} = I_m$

$$N_1 = N_2 = N_3 = N$$

$$\frac{d(\frac{S_1}{x_1})}{dx} = \frac{d(\frac{S_2}{x_2})}{dx} = \frac{d(\frac{S_3}{x_3})}{dx}$$

$$F_i = 6{,}4.10^{-8} \, N^2 \, I_m^2 \, [\sin^2 \omega t + \sin^2(\omega t + 120°) + \sin^2(\omega t + 240°)] \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

On se rappellera que : $\sin(\pi + a) = - \sin a$

d'où : $\sin(\omega t+240°) = -\sin(\omega t+60°) = -\sin\omega t \cos 60 - \cos\omega t \sin 60$

$\sin(\omega t+120°) = -\sin(\omega t-60°) = -\sin\omega t \cos 60 + \cos\omega t \sin 60$

d'où :

$$\sin^2\omega t + \sin^2(\omega t + 120°) + \sin^2(\omega t + 240°) =$$

$$\sin^2\omega t + (-\sin\omega t\cos 60° - \cos\omega t\sin 60°)^2 + (-\sin\omega t\cos 60 + \cos\omega t\sin 60°)^2 =$$

$$\sin^2\omega t + 2\sin^2\omega t \cos^2 60° + 2\cos^2\omega t \sin^2 60°$$

or $\cos 60° = \frac{1}{2}$ $\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ d'où il vient :

$$\sin^2\omega t + \frac{2}{4}\sin^2\omega t + \frac{3}{2}(1 - \sin^2\omega t) =$$

$$(1 + \frac{2}{4} - \frac{3}{2})\sin^2\omega t + \frac{3}{2} = \frac{3}{2}$$

d'où :

$$F_i = 6{,}4 \cdot 10^{-8} N^2 I_m^2 \frac{3}{2} \frac{d(\frac{S}{x})}{dx}$$

LA FORCE INSTANTANEE EST UNE CONSTANTE.

On note que à égalité de saturation avec un enroulement à courant continu ($I_m = I$), l'effort total est réduit de moitié (par enroulement).

On peut également noter que le point d'application de la force passe successivement par l'axe de chaque enroulement.

Remarques générales:

Le fer d'un électro-aimant alimenté en courant alternatif est mal utilisé puisque le courant I_m ne peut dépasser la valeur du courant continu sans provoquer de saturation.

Le déplacement du point d'application de la force dans le cas d'électro-aimants polyphasés à plusieurs noyaux ou la variation de la force développée par un électro-aimant monophasé provoquent des vibrations.

2. AMORTISSEMENT DES VIBRATIONS EN COURANT ALTERNATIF :

On peut amortir et même supprimer les vibrations en entourant une partie du pôle d'un enroulement par une spire en court-circuit pour créer un flux déphasé par rapport au flux principal.

Le flux résultant est dû à :

$$[N\ I_m\ \sin\omega t - k\ N'\ I'_m\ \sin(\omega t+\varphi)]^2$$

en appelant $k\ N'\ I'_m\ \sin(\omega t + \varphi)$ les ampères-tours correspondant au second enroulement et φ l'angle de déphasage des deux courants. Le coefficient k tient compte du fait que ces spires secondaires sont plus petites que les autres. Généralement l'enroulement en court-circuit (figure 22) embrasse une fraction importante (2/3) du pôle.

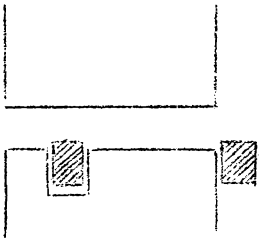


FIGURE 22

On calcule la section de cuivre, le nombre de spires de cet enroulement de même que la section de fer intéressée pour obtenir l'effet maximum d'amortissement.

Sans spires d'amortissement, il est impossible d'obtenir un appareil silencieux.

3. VARIATION DE L'EFFORT DANS UN ELECTRO-AIMANT A GRANDE COURSE :

L'on a vu que quelle que soit la nature du courant, l'effort est proportionnel au carré du courant et inversément proportionnel au carré de la course car :

$$\frac{d(\frac{S}{x})}{dx} \text{ est proportionnel à } \frac{1}{x^2}$$

Le courant continu absorbé est constant ou à peu près dans le cas d'un électro alimenté par une tension continue. Lorsque l'appareil est alimenté par une source alternative par contre, la variation de perméance entraîne une variation de flux, qui entraîne à son tour une variation d'impédance qui réduit à son tour le courant ce qui tend à stabiliser le flux. Le courant alternatif absorbé est donc réduit quand l'armature est attirée.

La force d'attraction ne croit plus d'une façon continue comme dans le cas d'un électro-aimant alimenté par une source continue mais suit une loi différente (figure 23: relative à un électro-aimant alimenté par une tension alternative).

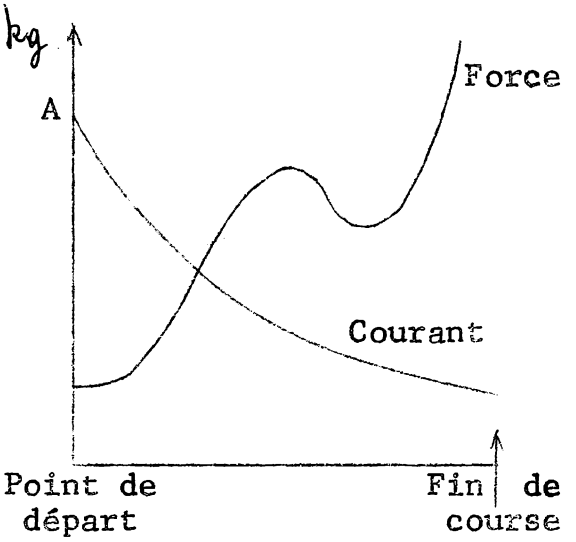


FIGURE 23

4. VARIATION DE L'EFFORT DANS UN ELECTRO-AIMANT A FAIBLE COURSE:

La figure 24 montre comment varie la force d'attraction dans le cas d'un électro-aimant alimenté en courant continu et en courant alternatif.

L'allure de cette courbe est explicable par l'influence de l'accroissement de l'impédance lorsque l'entrefer est réduit.

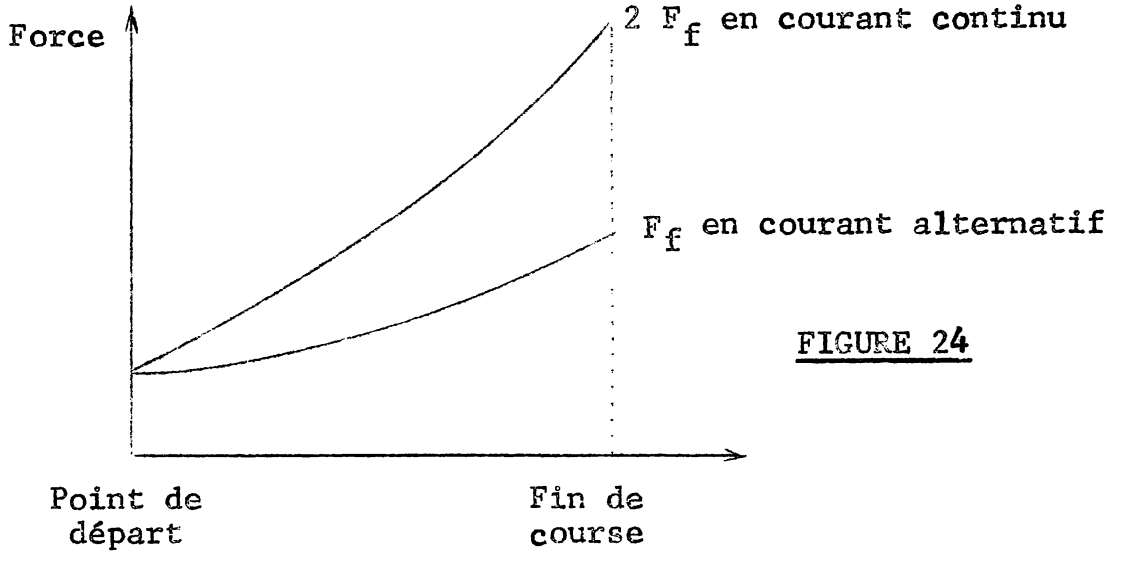


FIGURE 24

5. CONSTANCE DU FLUX DANS UN ELECTRO-AIMANT ALIMENTE PAR UNE TENSION SINUSOIDALE :

Dans le cas d'un électro-aimant alimenté par une tension continue, le flux est fonction de la perméance et des ampères-tours :

$$\Phi = N\ I\ P$$

Comme le courant est fonction de l'impédance lorsque l'électro-aimant est alimenté par une tension alternative, le flux sera donc fonction simultanément de l'impédance et de la perméance, or ces éléments jouent en sens opposé dans la variation du flux.

Appelons U la tension alternative appliquée

R la résistance de l'enroulement

L le coefficient de self-induction de l'enroulement qui varie avec la perméance :

$$\overrightarrow{U} = \overrightarrow{R\ I} + \overrightarrow{\omega\ L\ I}$$

Or généralement $R\ I \ll \omega\ L\ I$, $\omega\ L\ I$ est équilibré par la force électro-motrice induite d'où :

$$\omega\ L\ I = 4{,}44\ f\ N\ \Phi_m$$

On en déduit que Φ_m est indépendant de la position de l'armature. Cette propriété est caractéristique de l'électro-aimant alimenté en courant alternatif.

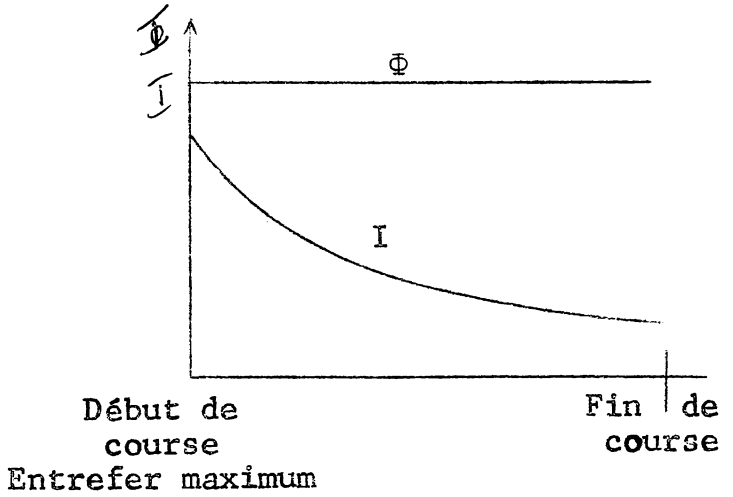


FIGURE 25

La valeur élévée du courant à l'enclenchement ne doit pas être perdue de vue lorsque l'appareil est appelé à un service fréquent (échauffement de l'enroulement et bonne tenue des contacts).

L'électro-aimant est en quelque sorte auto-régulateur de force quand il est alimenté en courant alternatif.

6. THEOREMES RELATIFS A L'ENROULEMENT ALIMENTE PAR UNE TENSION ALTERNATIVE :

THEOREME N°1

Accroître le nombre de spires d'un enroulement entraîne une réduction du nombre d'ampères-tours.

Soient r , x la résistance et la réactance d'une spire moyenne de l'enroulement. N r et N^2 x représentent la résistance et la réactance totale.

Le courant absorbé vaut : $\dfrac{U}{\sqrt{N^2r^2 + N^4x^2}}$

Le nombre total d'ampères-tours vaut :

$$\frac{N\,U}{\sqrt{N^2r^2 + N^4x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + N^2x^2}}$$

Accroître le nombre de spires revient donc à diminuer le nombre d'ampères-tours.

THEOREME N°2

Lorsque le nombre d'ampères-tours est insuffisant, il faut soit réduire le nombre de spires soit accroître la tension. Dans les deux cas, il faut vérifier si l'enroulement pourra supporter le courant qui sera plus élevé et si l'induction ne sera pas excessive.
Ceci résulte de l'examen de la formule précédente.

THEOREME N°3

Un électro à courant alternatif exige une puissance réactive minimum pour effectuer un travail déterminé.

On connait les formules :

$$F = 6{,}4 \cdot 10^{-8} (N\,I)^2 \frac{d(\frac{S}{x})}{dx} \qquad (1)$$

$$F = 4{,}07 \cdot 10^{4} B^2 S \qquad (2)$$

Supposons que la surface du noyau soit plane :

$$\frac{d(\frac{S}{x})}{dx} = -\frac{S}{x^2}$$

d'où :

$$F = -\frac{6{,}4.10^{-8}(N\,I)^2 S}{x^2} \qquad (3)$$

Multiplions les équations (2) et (3) membre à membre :

$$F^2 x^2 = 6{,}4.4{,}07.10^{-4} N^2 B^2 S^2 I^2$$

Or : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$

D'où en valeur absolue et en tension efficace :

$$E = 2\pi f N B S = 314 N B S \text{ pour } f = 50 \text{ Hz}$$

Et :

$$F^2 x^2 = \frac{6{,}4 \cdot 4{,}07 \cdot 10^{-4} E^2 I^2}{314^2}$$

Dans la formule (1) I représente le courant efficace, E I représente la puissance apparente.

En valeur absolue :

$$F.x = \sqrt{\frac{6{,}4.4{,}07.10^{-4} E^2 I^2}{314^2}}$$

$$\boxed{E.I = 6180\ F.x}$$

Or F.x représente le travail exécuté par le noyau

E.I représente la puissance apparente correspondante

A un travail de 1 kgm correspond une variation de puissance apparente de 6180 VA.

Or à fond de course la puissance réactive n'est pas nulle donc avant le début du mouvement du noyau, la puissance réactive dépasse 6180 VA par kgm de course. Soit P_{ri} la puissance réactive initiale.

Le rapport : $\frac{\Delta P_r}{P_{ri}}$ qui mesure la variation de puissance réactive par rapport à la puissance réactive initiale est voisin de l'unité lorsque le circuit magnétique n'est pas saturé. Ceci résulte du fait que l'on a négligé la réluctance et, à fortiori, la variation de réluctance du circuit magnétique.

REMARQUES:

1. Sur ce point l'électro alimenté en courant continu est complètement différent de l'électro alimenté en courant alternatif.

2. Les pertes par hystérésis et courants de Foucault ne doivent pas être négligées dans le calcul de l'échauffement d'un électro-aimant alimenté par une source de tension alternative.

7. COMPARAISON ENTRE LES ELECTRO-AIMANTS A COURANT CONTINU ET CEUX ALIMENTES EN COURANT ALTERNATIF :

Hypothèse : Les noyaux à courant continu ou à courant alternatif seront saturés de la même façon.

Conséquences :

1) Il en résulte qu'il faut une section double de fer lorsque l'appareil est alimenté en courant alternatif.

   Une saturation importante de l'appareil alimenté en courant alternatif provoque un mauvais rendement en V.A., la section de fer est au moins double de celle de l'appareil similaire alimenté en courant continu.

2) Le poids de l'appareil alimenté en courant alternatif est plus lourd (plus de fer et plus de cuivre).

3) En courant continu il n'y a pas de puissance minimum, l'on a vu antérieurement que l'addition de spires permet de réduire la puissance tout en maintenant la même force magnétomotrice.

   En courant alternatif la puissance apparente réactive minimum est de 6.180 V.A. par kgm.

4) L'électro-aimant à courant alternatif est plus rapide car la pointe de courant à l'enclenchement est très élevée.

5) Il faut feuilleter le noyau magnétique d'un électro-aimant alimenté en courant alternatif.

6) Un électro-aimant à courant continu doit être équipé d'une résistance d'économie qui n'est pas nécessaire dans le cas d'un électro-aimant alimenté par une source de tension alternative dont l'enroulement présente une self très élevée quand l'armature est attirée.

8. CALCUL D'UN ELECTRO-AIMANT ALIMENTE PAR UNE SOURCE DE TENSION ALTERNATIVE :

Le calcul est assez bien apparenté à celui d'un électro-aimant alimenté par une source de tension continue sauf sur un point fondamental.

La détermination des ampères-tours, du flux, des inductions doit être faite sur la base des formules établies pour le cas de l'alimentation par une source alternative.

La différence réside dans le fait que dans le cas d'une tension continue d'alimentation, on détermine la section du conducteur puis on passe à la détermination des autres éléments comme le nombre de tours.

Soient E la tension efficace en volts

F la force en kg

x la course en m

On part de l'équation : $F = 4{,}07.10^{4}\ B^{2}\ S$

On s'impose une induction maximum B_m valant $\sqrt{2}\ B$, on en déduit la section S (en m^2).

On considère ensuite l'équation : $F = 6{,}4.10^{-8}(NI)_e^2 \dfrac{d(\frac{S}{x})}{dx}$

On déduit : $\dfrac{d(\frac{S}{x})}{dx}$ de la valeur de S et de x .

On en déduit $(N\ I)_e$ où I représente le courant efficace.

On majore la valeur trouvée pour tenir compte des ampères-tours dans le circuit magnétique que l'on se fixe en première approximation.

Soit $(NI)_e$ la valeur des ampères tours dans l'entrefer.

Soit $k(NI)_e$ la valeur des ampères tours dans le circuit magnétique.

$$k = \ldots\ldots \quad 0,1 \ldots\ldots \quad 0,2 \ldots\ldots$$

Les ampères tours totaux à créer par l'enroulement valent :

$$(1 + k)\ (NI)_e$$

Calcul du nombre de spires N :

$$e = 4,44\ f\ B\ S \quad \text{d'où} \quad N = \frac{E}{e}$$

Comme l'on a déjà calculé $(1 + k)(NI)_e$, l'on en déduit I.

Remarques :

1. La section du fil constituant l'enroulement sera déterminée de façon que RI soit négligeable devant la tension appliquée.

2. Si l'on néglige les ampères tours dans le circuit magnétique l'on voit que :

$$B = \mu_o \frac{N\ I}{x}$$

équation qui peut être mise sous la forme :

$$I = \frac{B\ x}{\mu_o\ N}$$

On peut déduire que, en première approximation, le courant est proportionnel à l'entrefer pour une force d'attraction et une section d'entrefer déterminées.

§ 4 . T E C H N O L O G I E

1. TYPES D'ELECTRO-AIMANTS :

Les électro-aimants sont utilisés dans tous les domaines de la technique sous la forme :

1) d'électro-aimants de frein pour engins de levage, tels que ponts-roulants et grues, fournissant des efforts de quelques dizaines ou même centaines de kilos, sur des courses valant généralement quelques millimètres à quelques centimètres. Généralement l'électro-aimant excité libère le frein, pour assurer le blocage de la charge en cas de manque de courant.

2) d'électros de verrouillage dans des machines diverses, telles que les machines-outils. Des électros verrouillent fréquemment les portes des armoires à haute tension lorsqu'elles sont en service.

3) de contacteurs ou disjoncteurs commandés à distance.

4) d'électros à minimum ou maximum de tension ou de courant dans les contacteurs ou disjoncteurs

5) de relais électromagnétiques de formes et dimensions diverses, suivant qu'ils sont utilisés en téléphonie, en signalisation des chemins de fer, dans les commandes automatiques, dans les circuits auxiliaires des centrales électriques, etc...

Les applications sont quasi illimitées. La liste ci-dessus n'est pas limitative. Les figures 25 à 33 montrent, schématiquement, quelques exemples typiques d'électro-aimants, choisis parmi les plus courants.

Un électro-aimant se compose d'un circuit magnétique et d'un enroulement. Le circuit magnétique se compose d'une partie fixe, supportant l'enroulement réparti sur un ou plusieurs noyaux, et d'une partie mobile dite "armature mobile", qui actionne des contacts, un verrou, entraîne ou supporte une charge, etc ...

Il faut limiter les pertes par courants de Foucault dans le fer en feuilletant le circuit magnétique (figures 26, 27, 29 et 31). Si on utilise une source de tension alternative, il faut aussi prévoir une fente longitudinale sur la carcasse en laiton sur laquelle est bobiné l'enroulement pour éviter qu'elle ne joue le rôle de spire de court-circuit.

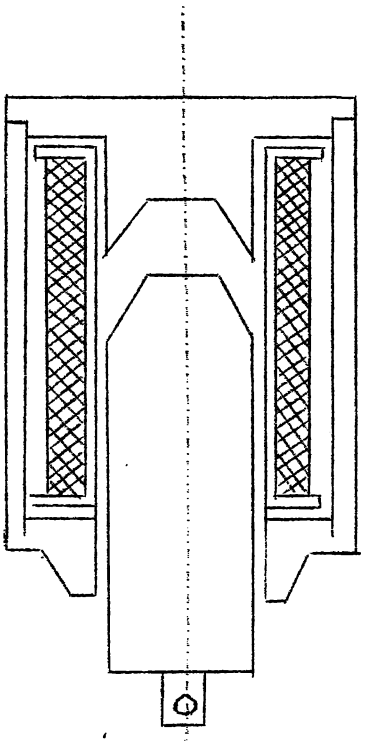


Figure 25 : électro de frein à CC , type cuirassé à noyau plongeur

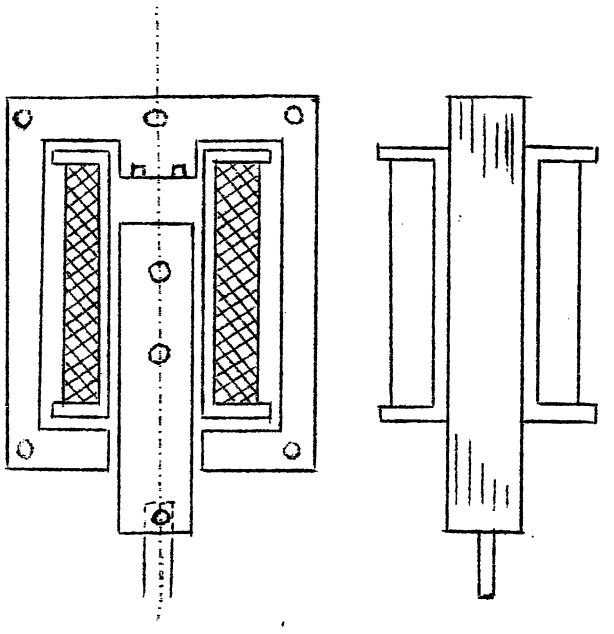


Figure 26 : électro de verrouillage à CA , à circuit magnétique et noyau plongeur feuilletés , avec bague de court-circuit.

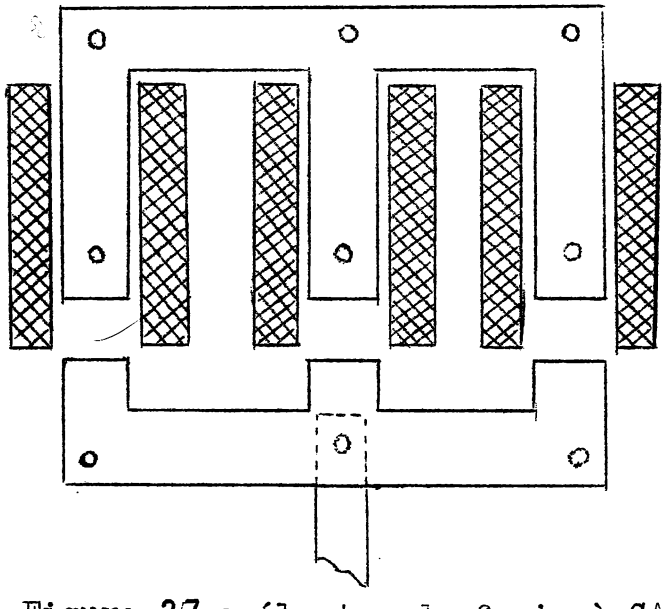


Figure 27 : électro de frein à CA triphasé , circuit magnétique feuilleté.

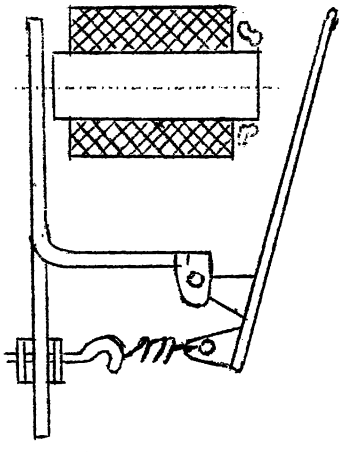


Figure 28 : électro de relais à attraction directe, à rappel par ressort de traction.

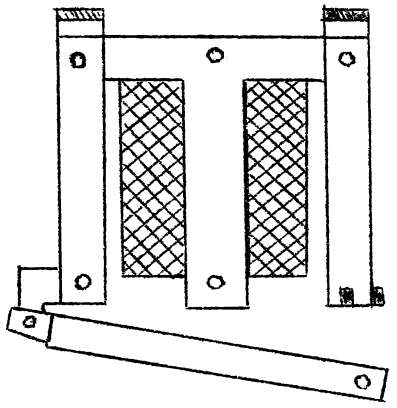


Figure 29 : électro de relais à CA monophasé, rappel par gravité.

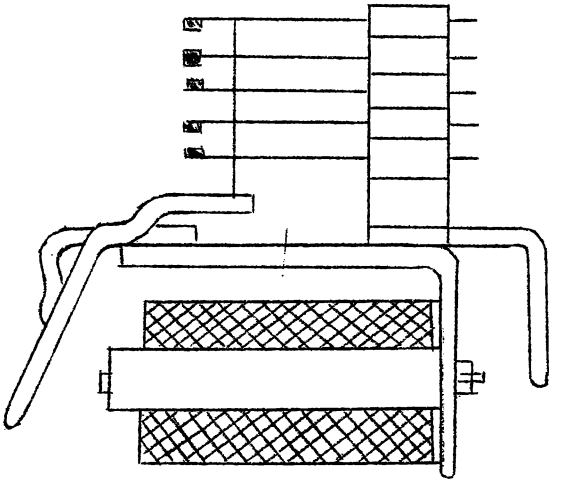


Figure 30 : relais à contacts multiples, armatures mobile sans axe.

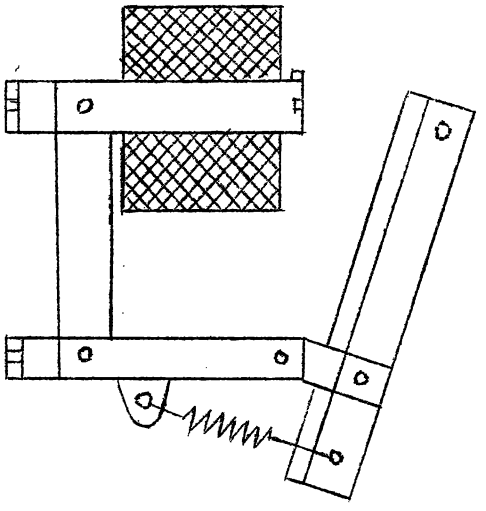


Figure 31 : électro de relais à CA monophasé

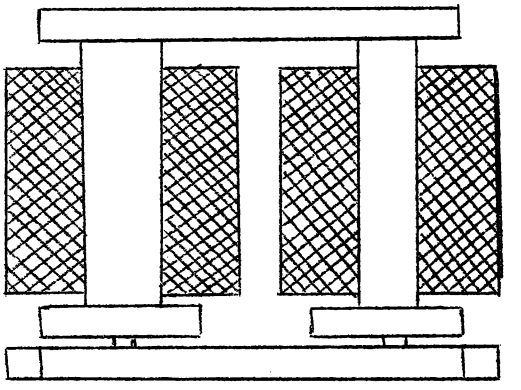


Figure 32 : électro dit" en fer à cheval" de relais à CC, noyaux avec pièces polaires.

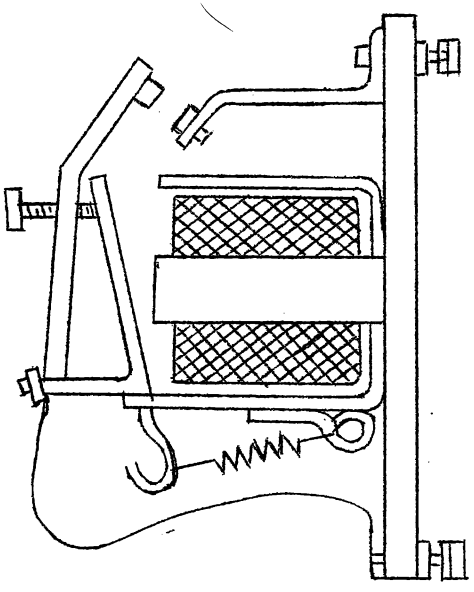


Figure 33 : contacteur de faible puissance, raccordement arrière.

Cependant dans les petits relais, par exemple, on se contente parfois de feuilleter le noyau supportant la bobine (figure 28 par exemple), et d'utiliser pour le reste du circuit magnétique une tôle large et mince de résistivité relativement élevée.

Souvent même le noyau est plein lui aussi, mais on y pratique une fente axiale pénétrant jusqu'à l'axe du noyau pour allonger le trajet des lignes de courants de Foucault.

Les circuits magnétiques feuilletés sont fabriqués en tôles de transformateurs, qualité 1 à 3 W/kg (à 50 p/s et 1Wéb/m^2), isolées au papier ou au vernis, assemblés par rivets éventuellement isolés et judicieusement placés pour éviter de former avec les tôles raidisseuses des spires en court-circuit traversées par le flux principal.

Les circuits magnétiques d'électros à courant continu sont fabriqués en fers magnétiques spéciaux, choisis pour leur perméabilité élevée, leur faible rémanence, et éventuellement un cycle d'hystérésis très "mince", tels que (dans l'ordre croissant des qualités) : fer de Suède, fer Sandvik, fer Anhyster, Mumétal, etc ...

L'armature mobile de certains électros est un noyau plongeur (figures 25 et 26), généralement à face plane en courant alternatif (figure 26), et parfois à face cônique ou cônique tronquée, pour permettre de plus grande courses en courant continu (figure 25).

Les noyaux des électro-aimants alimentés en courant continu sont parfois munis d'épanouissements polaires (figure 32) pour augmenter la force attractive ou réduire les ampères-tours nécessaires.

L'entrefer en position d'attraction n'est généralement pas nul, et est maintenu par des butées de sécurité en métal non magnétique (bronze ou acier antimagnétique), dans le but d'éviter un "collage" de l'électro-aimant par magnétisme rémanent, lorsqu'on coupe le courant.

Le rappel de l'armature mobile est assuré par ressort (figures 28, 31 et 33), par gravité (figures 29 et 32), par le dispositif commandé (figure 30 : rappel par lames de contacts en bronze), ou par des combinaisons de ces moyens.

2. DEFINITIONS RELATIVES AUX RELAIS :

Un relais est un organe qui, sous l'effet d'une variation dans les conditions d'un circuit électrique, produit le fonctionnement d'organes dans un circuit ou plusieurs circuits.

C'est habituellement un appareil électro-magnétique relativement petit et sensible, qui établit ou coupe des contacts. Ceux-ci commandent, dans beaucoup de cas, le fonctionnement d'autres appareils ou de machines plus importantes ou éloignées.

En principe, un contacteur est aussi un relais, mais on réserve le nom de contacteur à un appareil dont les contacts sont capables d'une puissance de coupure assez élevée (intensité de 20 à quelques centaines d'ampères).

Un disjoncteur assure, en plus, la rupture automatique du circuit commandé, en cas de surintensité ou de chute de tension.

Un relais se trouve en position "travail" ou position d'attraction, lorsque l'armature mobile est attirée sous l'action du courant circulant dans l'enroulement.

Il se trouve en position "repos" ou position de chute, lorsque le courant de l'enroulement est coupé ou est trop faible pour maintenir en position travail l'armature mobile, rappelée par ressort ou par gravité vers la position repos.

Certains relais ont deux positions stabilisées, par exemple : une position neutre et deux positions de travail distinctes, obtenues d'après le sens du courant dans un même enroulement, ou en excitant l'un ou l'autre des deux enroulements.

Les types de relais sont nombreux et répondent à des besoins divers.

Les contacts sont appelés "travail" (ou hauts, ou normalement ouverts), ou bien "repos" (ou bas, ou normalement fermés), suivant qu'ils sont établis respectivement en position "travail" ou "repos".

Un groupe de contacts haut et bas est dit "chevauchant" lorsque l'un sétablit avant que l'autre ne se coupe, à l'excitation et à la désexcitation du relais.

Habituellement, lors de l'attraction d'un relais par exemple, un contact NF (normalement fermé) se coupe avant qu'un contact NO (normalement ouvert) ne se ferme.

La course d'un relais ou, plus exactement, la course angulaire ou linéaire de l'armature mobile, se compose de trois parties : compression des contacts travail, des contacts repos et entre les deux, la zône neutre où aucun contact n'est établi, sauf éventuellement les contacts chevauchants.

Un bon contact doit prévoir un frottement du plot mobile sur le plot fixe, pour tendre à éliminer la couche d'oxyde ou les impuretés éventuelles.

Les courses de compression et les pressions doivent être suffisamment grandes pour conserver un bon contact, même après usure sous l'action de l'arc.

Le choix des matières à contact se fait d'après la résistance électrique (ohmique) désirée, ou d'après la résistance à l'action de l'arc ou l'étincelle de rupture : cuivre, argent, or, tungstène, carbone, carbo-argent, cuivre-tungstène, argent-tungstène, etc ... (1).

Le courant ou la tension d'attraction est généralement plus élevé que le courant ou la tension de chute, sauf artifices de construction.

Le rapport du courant de chute au courant d'attraction (ou des tensions correspondantes) est appelé "coefficient de chute". Dans beaucoup d'applications, ce rapport (appelé aussi "sensibilité") doit être aussi élevé que possible, par exemple : 70 à 80%.

Les temps de fonctionnement des relais ont une importance considérable dans diverses applications. Les relais peuvent être temporisés (ou retardés) à l'attraction ou à la chute par minuteries, dash-pots, bagues de court-circuit (en C.C.), condensateurs agissant dans le circuit de la bobine (en C.A.).

---

(1) Le cuivre est normalement utilisé. L'argent est utilisé pour réduire la chute de tension. L'or est utilisé en couche mince lorsqu'on craint l'oxydation surtout pour les faibles tensions. Les carbo-argents et similaires sont utilisés quand on craint la soudure des contacts.

Le cuivre n'est pas admis pour les contacts de longue durée sous forte intensité dans l'air en raison de l'oxydation du métal.

Les temps de fonctionnement se définissent comme suit : pour un relais travaillant par tout ou rien, c'est-à-dire par application ou coupure brusque de la tension :

- le temps d'attraction est le temps qui s'écoule entre l'établissement du circuit de la bobine et l'établissement des contacts hauts

- le temps de chute est le temps compris entre la coupure du circuit de la bobine et l'établissement des contacts bas

- les temps de coupure d'un contact repos à l'attraction, de coupure d'un contact travail à la chute, se définissent d'une manière analogue, de même que les temps de passage en zône neutre à l'attraction, ou à la chute.

3. CYCLE MAGNETIQUE D'UN RELAIS EN COURANT ALTERNATIF :

La figure 34 représente le cycle d'un relais, dans le diagramme du flux en fonction des ampères-tours.

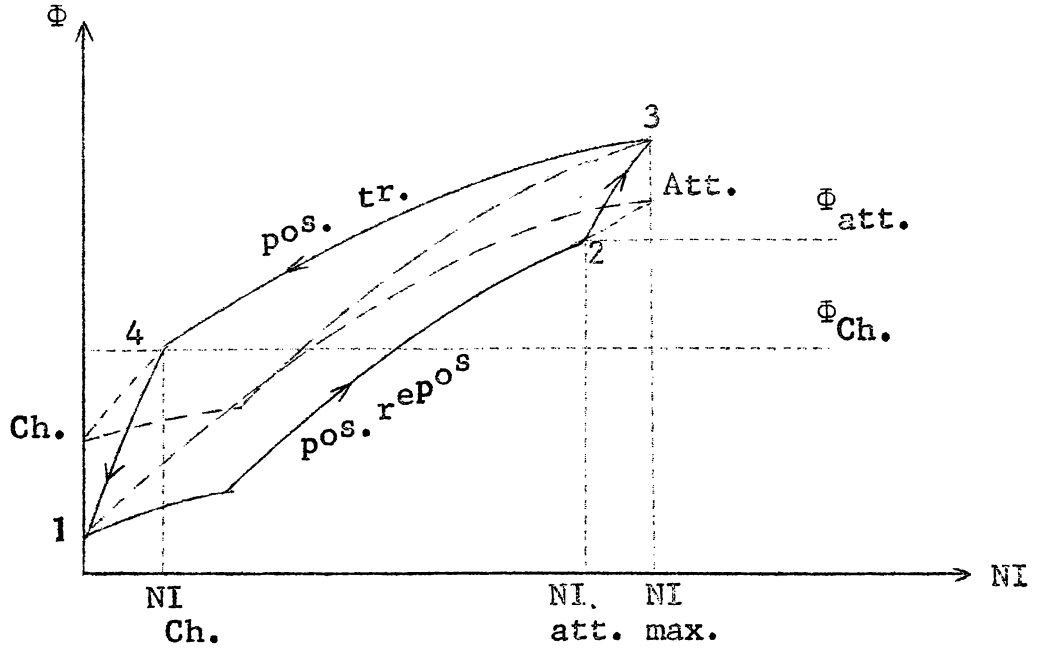


FIGURE 34

On reconnait en 1, 2, 5, 1 et en 6, 3, 4, 6 des portions des cycles d'hystérésis, respectivement en positions repos et travail.

Ces cycles se rapportent au trajet complet du flux, fer et entrefer, lorsque les A.T. varient de 0 à un maximum N I_{max} et inversément.

Le cycle du relais 1, 2, 3, 4, 1 s'explique comme suit :

1 - 2 : position repos, le flux croît suivant la branche inférieure du cycle d'hystérésis

2 : le flux devient suffisant pour produire l'attraction de l'armature mobile, le couple moteur devenant et se maintenant supérieur au couple résistant

2 - 3 : attraction du relais ; le chemin exact de 2 en 3 dépend de la vitesse de variation du courant et de la vitesse d'attraction

3 - 4 : les A.T. diminuent, le flux suit la branche supérieure du cycle d'hystérésis en position travail

4 : le couple d'attraction devient et reste inférieur au couple de rappel, la chute du relais se produit

4 - 1 : chute du relais, le cycle du relais se ferme

Les ampères-tours d'attraction et de chute se rapprochent d'autant plus l'un de l'autre que les entrefers en positions travail et repos sont plus voisins, car les deux courbes d'hystérésis tendent à se rapprocher.

Pour une course donnée, c'est-à-dire pour une variation donnée de l'entrefer, le coefficient de chute est d'autant plus grand que l'entrefer "travail" est plus grand.

Cependant, en pratique, il existe une limite maximum du coefficient de chute d'un relais donné, à partir de laquelle le relais ne comprime plus complètement ses contacts repos à la chute progressive, le flux de chute étant relativement élevé.

Le diagramme des efforts d'attraction en fonction du courant, peut se déduire du précédent, en remarquant que les efforts varient comme le carré du flux, pour un entrefer donné.